

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh teplovodního výměníku spalin na krbová kamna

Project of Hot Water - Combustion Products Heat Exchanger for Fire Place Stove

Studentka:

Lenka Popelková

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Zdeněk Kadlec, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Lenka Popelková**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3907R009 Provoz energetických zařízení**
Téma: **Návrh teplovodního výměníku spalin na krbová kamna**
Project of Hot Water - Combustion Products Heat Exchanger for Fire
Place Stove

Zásady pro vypracování:

Bakalářská práce bude obsahovat:

1. Popis výměníků tepla na krbová kamna.
2. Stechiometrický výpočet množství spalin.
3. Návrh teplovodního výměníku spalin o výkonu cca 5 kW.
4. Kontrolní výpočet výměníku.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BLAHOŽ, V., KADLEC, Z. *Základy sdílení tepla*. 2.vyd. Ostrava: Cicero, 2000. 110 s. Edice SPBI Spektrum, ISBN 80-902001-1-7.
[2] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha: ČVUT, 2002.
[3] ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEYSSLER, J. *Parní kotle*. 1 vyd. Praha: SNTL 1983. 864 s.

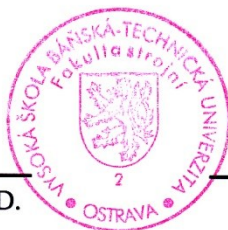
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Kadlec, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studentky

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně všech příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19. 5. 2012

..... Popelková

podpis studentky

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 19.5.2012

Popelková

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Lenka Popelková

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ostrava

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

POPELKOVÁ, L. *Návrh teplovodního výměníku spalín na křbová kamna: bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 57 s. Vedoucí práce: Kadlec, Z.

Práce je zaměřena na návrh teplovodního výměníku spaliny-voda na křbová kamna (KK) tak, aby výměník dosáhl požadovaného výkonu. Seznamuje s vývojem a stavem KK v současnosti na trhu. Pro výpočet je zvolen výměník umístěn ve spalovací komoře. Jsou použité výpočty ze stechiometrie a sdílení tepla. Pomocí nich se dochází k závěru, že navrhnutý výměník splňuje požadavek a má potřebný výkon.

POPELKOVA, L. *Project of Hot Water - Combustion Products Heat Exchanger for Fire Place: Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2012, 57 p. Thesis head: Kadlec, Z.

The thesis aims design of Hot Water – Flue Gases Heat exchanger for Wood Burning Stove, so that the exchanger meets required power output. It introduces development of heat exchangers and currently used types of hot water exchangers that are currently on the market. For the calculations I chose combustion chamber located heat exchanger. There are used stoichiometric and heat transfer formulas for the calculations. Using these, it is concluded that the proposed heat exchanger meets the requirement and has the requisite power output.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod	10
1 Vytápění rodinných domů	11
1.1 Tepelná pohoda člověka	11
1.2 Rozdělení vytápění	12
1.2.1 Teplovzdušné vytápění	12
1.2.2 Teplovodní vytápění	13
1.2.3 Infračervené vytápění	15
1.3 Další rozdělení	17
2 Krby a kamna	19
2.1 Historie	19
2.2 Krb	19
2.3 Kamna	20
2.4 Krbová kamna	21
2.4.1 Bezpečnost provozování krbových kamen	22
2.5 Současnost	23
3 Výměníky	25
3.1 Rozdělení výměníků	25
3.2 Výměník pro krbová kamna	27
3.2.1 Zapojení teplovodního výměníku	28

3.2.2	Bezpečnost provozování teplovodního výměníku.....	29
4	Stechiometrické výpočty	30
4.1	Výchozí hodnoty	30
4.2	Stechiometrické objemy vzduchu a spalin.....	32
4.3	Nadstechiometrické objemy vzduchu a spalin.....	33
4.4	Koncentrace jednotlivých složek ve spalinách	35
5	Návrh teplovodního výměníku.....	37
5.1	Volba materiálu, typu konstrukce a rozměrů výměníku.....	37
5.2	Výpočet teploty spalin ve spalovací komoře	38
5.3	Výpočet součinitele přestupu tepla na straně spalin	41
5.3.1	Přestup tepla konvekcí.....	41
5.3.2	Přestup tepla radiací	45
5.3.3	α spalin celkem	47
5.4	Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vody.....	47
6	Kontrolní výpočet výměníku.....	51
	Závěr.....	53
	Seznam použitých zdrojů	54
	Poděkování	56
	Seznam příloh.....	57

Seznam použitých značek a symbolů

A	popelovina v palivu	[1]
A_p	součinitel absorpivitu plamene	[1]
C	uhlík v palivu	[1]
Gr	Grashofovo kritérium	[1]
H	vodík v palivu	[1]
L	charakteristický rozměr	[m]
N	dusík v palivu	[1]
Nu	Nusseltovo kritérium	[1]
O	kyslík v palivu	[1]
O	obvod kanálu	[m]
Pr	Prandtlovo kritérium	[1]
Q_i	výhřevnost paliva	[kW]
$Q_{sál}$	výkon sáláním	[kW]
Q_{vym}	výkon výměníku zadáný	[kW]
Q	výkon výměníku vypočtený	[kW]
Re	Reynoldsovo kritérium	[1]
S	plocha kanálu	[m ²]
S_{SK}	povrch pláště spalovací komory	[m ²]
S_{TS}	teplosměnná plocha výměníku	[m ²]
S_{tr}	průřez trubek	[m ²]
T_n	teplota za normálních podmínek	[K]
$V_{Ar,vz,s}$	objem Ar ze vzduchu skutečný	[m ³ _n /kg]
$V_{CO_2,p,s}$	objem CO ₂ z paliva skutečný	[m ³ _n /kg]
$V_{CO,s}$	objem CO skutečný	[m ³ _n /kg]
$V_{CO_2,vz,s}$	objem CO ₂ ze vzduchu skutečný	[m ³ _n /kg]
$V_{H_2O,s}$	objem páry skutečný	[m ³ _n /kg]
$V_{H_2O,t}$	objem páry teoretický	[m ³ _n /kg]
$V_{N_2,p,s}$	objem N ₂ z paliva skutečný	[m ³ _n /kg]
$V_{N_2,vz,s}$	objem N ₂ ze vzduchu skutečný	[m ³ _n /kg]
$V_{O_2,s}$	objem O ₂ skutečný	[m ³ _n /kg]
V_{pal}	objem paliva	[m ³]
V_{sp,s^s}	objem spalin skutečných suchých	[m ³ _n /kg]
V_{sp,s^v}	objem spalin skutečných vlhkých	[m ³ _n /kg]
V_{sp,t^v}	objem spalin teoretických vlhkých	[m ³ _n /kg]
V_{SK}	objem spalovací komory	[m ³]
V_{sp,t^s}	objem spalin teoretických suchých	[m ³ _n /kg]
V_{vz,s^s}	objem vzduchu skutečného suchého	[m ³ _n /kg]
V_{vz,s^v}	objem vzduchu skutečného vlhkého	[m ³ _n /kg]
V_{vz,t^s}	objem vzduchu teoretického suchého	[m ³ _n /kg]
W	voda v palivu	[1]
$\dot{V}_{sp,s}$	objemový průtok spalin skutečný	[m ³ /s]
\dot{V}_v	objemový průtok vody	[m ³ /s]

c_{pi}	střední měrná tepelná kapacita složek spalin	[kJ/(m ³ ·K)]
c_{ppal}	měrná tepelná kapacita paliva	[kJ/(kg·K)]
c_{psp}	střední měrná tepelná kapacita spalin	[kJ/(m ³ ·K)]
c_{pv}	měrná tepelná kapacita vody	[kJ/(kg·K)]
c_{pvz}	měrná tepelná kapacita vzduchu	[kJ/(m ³ ·K)]
d_h	hydraulický průměr	[m]
g	gravitační zrychlení	[m/s ²]
i_{pal}	entalpie paliva	[kJ/kg]
i_{spal}	entalpie spalin	[kJ/kg]
i_{vz}	entalpie vzduchu	[kJ/kg]
k	součinitel prostupu tepla	[W/(m ² ·K)]
l	střední délka zářícího paprsku	[m]
\dot{m}_{pal}	hmotnostní průtok paliva	[kg/s]
\dot{m}_v	hmotnostní průtok vody	[kg/s]
n	přebytek vzduchu	[1]
p_0	výchozí tlak	[Pa]
p_i	parciální tlak	[Pa]
q_{rad}	hustota tepelného toku radiací	[W/m ²]
t_n	teplota za normálních podmínek	[°C]
t_{1v}	vstupní teplota do výměníku	[°C]
t_{2v}	výstupní teplota z výměníku	[°C]
$t_{urč}$	teplota určující	[°C]
w	rychlost proudění	[m/s]
$\alpha_{sp,konv}$	teplotní součinitel prostupu tepla spalin konvekci	[W/(m ² ·K)]
$\alpha_{sp,rad}$	součinitel přestupu tepla spalin radiací	[W/(m ² ·K)]
α_{sp}	součinitel přestupu tepla spalin	[W/(m ² ·K)]
α_v	součinitel přestupu tepla vody	[W/(m ² ·K)]
β	korekční součinitel vlivu záření par	[1]
γ	součinitel objemové roztažnosti	[1]
Δt_{pal}	rozdíl teplot paliva	[°C]
Δt_{sp}	rozdíl teplot spalin	[°C]
$\Delta t_{stř}$	střední logaritmický teplotní rozdíl	[°C]
Δt_{vz}	rozdíl teplot vzduchu	[°C]
$\varepsilon_{CO_2,pl}$	emisivita CO ₂ pro teplotu plechu	[1]
$\varepsilon_{CO_2,sp}$	emisivita CO ₂ pro teplotu spalin	[1]
$\varepsilon_{H_2O,pl}$	emisivita H ₂ O pro teplotu plechu	[1]
$\varepsilon_{H_2O,sp}$	emisivita H ₂ O pro teplotu spalin	[1]
ε_{pl}	stupeň černosti plechu	[1]
ε_L	opravný součinitel pro krátké trubky	[1]
ε_{pl}	součinitel emisivity plechu	[1]
ε_{sp}	emisivita zářících molekul spalin	[1]
η_{sk}	účinnost spalovací komory	[%]
λ	vlnová délka	[m]
ν	součinitel vlhkosti	[1]
ν	kinematická viskozita	[m ² /s]
ω_i	koncentrace složek spalin	[1]

Úvod

Téma své bakalářské práce jsem si vybrala z mnoha důvodů. Jeden z nich je ten, že problematika krbových kamen se týká široké veřejnosti, nejen specializovaných techniků. A mnohým lidem, kteří si krbová kamna chtějí pořídit jako zdroj teplé vody pro vytápění, může má práce posloužit. Budu se v ní zabývat návrhem teplovodního výměníku. Zvolila jsem si návrh výměníku, který se umísťuje místo zadní strany krbových kamen. Mám zadaný výkon, který by měly kamna být schopny odvést do vody ve výměníku, a toho se pokusím ve své práci držet. Je to 5 kW a spolu se sálavou složkou kamen by měl tento výměník být schopen vyrobit teplo pro běžný rodinný dům 4 + 1.

Nejprve čtenáři shrnu současný stav na trhu s lokálními topidly, vysvětlím důležité pojmy a blíže přiblížím funkci teplovodního výměníku. Z načerpaných informací se pokusím navrhnout typ a rozměry výměníku, se kterými budu dále počítat. Ve výpočtové části se pomocí stechiometrie, termomechaniky a sdílení tepla pokusím dopočítat konkrétních teplot ve spalovací komoře, součinitelů přestupu tepla na straně spalín i vody a z nich dále součinitele prostupu tepla. Až budu mít vypočtené všechny důležité hodnoty, provedu výpočet pro klasický souprroudý výměník. Tímto si ověřím, zda mnou navržené rozměry vyhovují a popřípadě je upravím tak, aby splnily dané požadavky. Tím splním zadání mé bakalářské práce.

1 Vytápění rodinných domů

Pokud se rozhodneme pořídit si rodinný dům, nebo máme nějaký, který chceme rekonstruovat, je důležité správně rozhodnout o vhodném způsobu vytápění objektu a přípravy teplé vody. Správná volba může výrazně ovlivnit kvalitu a ekonomickou stránku našeho budoucího života po mnoho let, a proto je důležité, abychom jí věnovali patřičnou pozornost. Výběr tepelného zdroje je třeba si pořádně rozmyslet. Měl by být především spolehlivý, mít pohodlnou obsluhu, teplo by měl vyrábět levně a efektivně a v neposlední řadě svým provozem nikterak neobtěžovat sousedy ani obyvatele v domě. Tím myslím hlavně odvod spalín, které by neměly znečišťovat okolí, zapáchat či jinak znepříjemňovat život.[1]

Vývoj v celém odvětví tepelné techniky je v současnosti ovlivněn především následujícími faktory:

1. zlepšování tepelněizolačních vlastností novostaveb a tím nižší potřeba tepla na vytápění;
2. snižování potřeby tepla na vytápění i ve starších domech díky výměně oken a zateplení;
3. požadavky zákazníků na růst účinnosti výroby tepla v kotlích a čisté spalování;
4. postupné rozšiřování alternativních technologií výroby tepla a kombinace výroby tepla s decentralizovanou výrobou elektřiny [2]

1.1 Tepelná pohoda člověka

Tepelná pohoda je stav, kdy nemáme pocit chladu ani nadměrného tepla. Je známé, že tepelná pohoda člověka má na subjektivní pocit pohody a na míru odpočinku vyšší vliv než například hluk či emise. Je to tedy důležitý ukazatel, kterým se také musíme zabývat při volbě vhodného vytápění s vhodnými parametry. Měli bychom brát ohled na věk a stav ostatních členů rodiny a řídit se doporučenými hodnotami teplot, vlhkostí a rychlostmi proudění vzduchu.

Činitelé, kteří ovlivňují tepelnou pohodu člověka jsou subjektivní a objektivní. Subjektivní jsou ty, které máme dány fyziologickými parametry jako jsou stáří, pohlaví člověka, hmotnost, zdravotní stav a schopnost adaptace. A objektivní jsou mikroklimatické parametry v místě našeho pobytu. Například teplota vzduchu, teplota okolních předmětů,

stěn, oken, osvětlení, spotřebičů, vlhkost a rychlost proudění vzduchu. Subjektivní činitelé nás ovlivňují každého trochu jinak, zatímco ty objektivní jsou nám dány všem stejně. Tito činitelé se dají ovlivnit druhem oblečení, které máme na sobě a aktivitou, kterou právě vykonáváme. [3]

1.2 Rozdělení vytápění

Jak vidíme, výběr konkrétního způsobu vytápění není vůbec jednoduchý a abychom to měli ještě složitější, v dnešní době je k dostání několik desítek druhů a poddruhů a různých kombinací jednotlivých druhů vytápění. Z pohledu z druhé strany je pro nás ale výhodné, že různými kombinacemi můžeme dosáhnout právě toho, co by každému z nás konkrétně vyhovovalo. Přestože se v mé práci budu zabývat podrobně pouze krbovými kamny, považuji za přínosné seznámit nás s možnostmi, které nám současný trh s tepelnou technikou nabízí.

Rozdělení podle teplotního média:

- Teplovzdušné vytápění
- Teplovodní vytápění
- Infračervené vytápění

1.2.1 Teplovzdušné vytápění

Vytápění více místností jedním zdrojem tepla za použití rozvodu teplého vzduchu znali již staří Řekové, Římané či Korejci. Výhody tohoto způsobu vytápění jsou zřejmé. Jelikož se dá používat jeden zdroj tepla pro více místností, můžeme zde regulovat, kam teplo půjde, kolik ho tam půjde a v jaké tepelné kvalitě. K ohřevu teplého vzduchu máme na výběr ze spousty možností. Tak stejně k jeho rozvodům a dopravě po domě. Můžeme využívat přirozené cirkulace vzduchu v domě tak, aby se teplý vzduch dostal rovnoměrně do všech požadovaných prostor nebo použijeme vhodný ventilátor, který cirkulaci vzduchu zajistí. V dvoupatrových domech se běžně používá samotížný systém, který pracuje na principu stoupání teplého vzduchu – Obr. č. 1.1. Tento systém nepotřebuje žádný pohon.

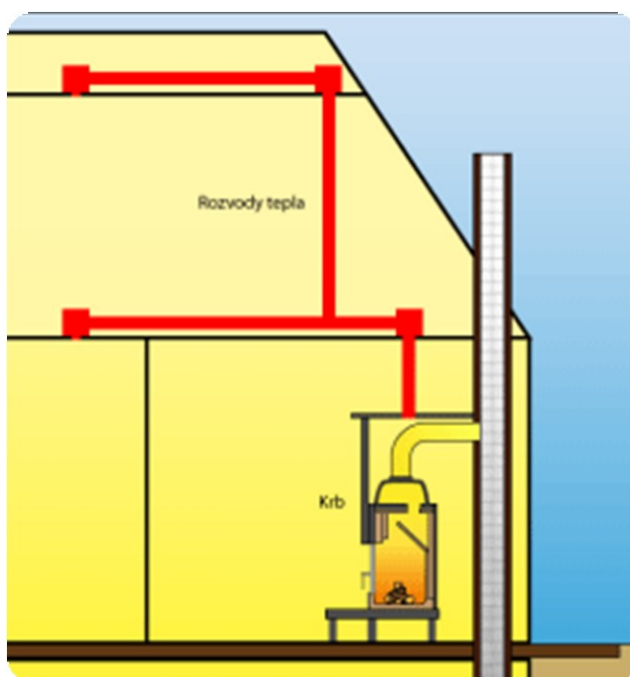
Výhody teplovzdušného vytápění:

- nízké náklady na kompletní rozvod
- rychlé roztopení celého systému

- nízká teplota ohřívaného média (do 50 °C)
- není nutná závislost na elektřině (při samotížném zapojení)
- nezávislá alternativa vhodná např. do hor

Nevýhody teplovzdušného vytápění:

- špatná možnost akumulace
- víření prachu do vzduchu
- suchý vzduch
- rozvádí zvuk – nutná protizvuková izolace [4]

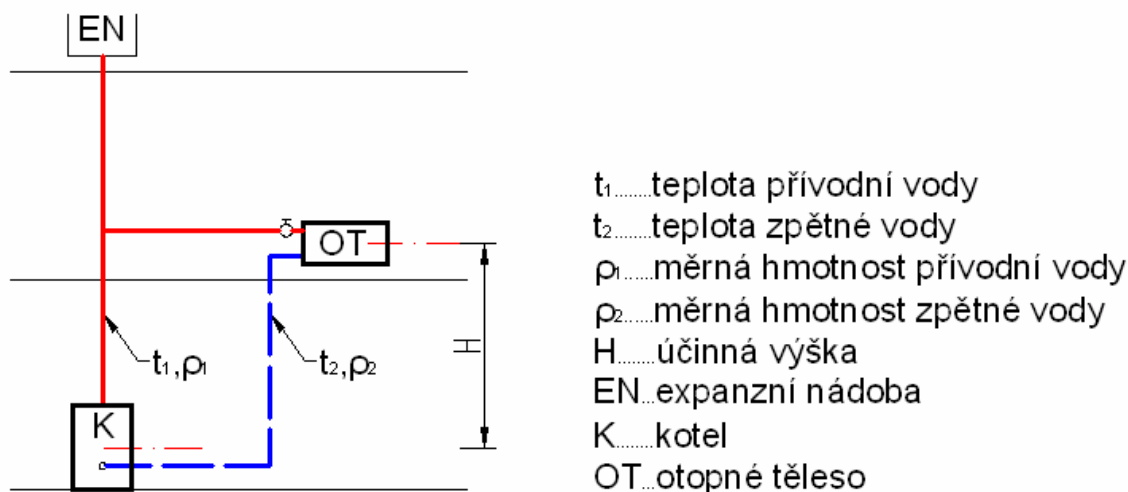


Obr. č. 1.1: schéma teplovzdušného vytápění
[http://www.krbynej.cz/soubory/horkovzduzny_rozvod_full.png]

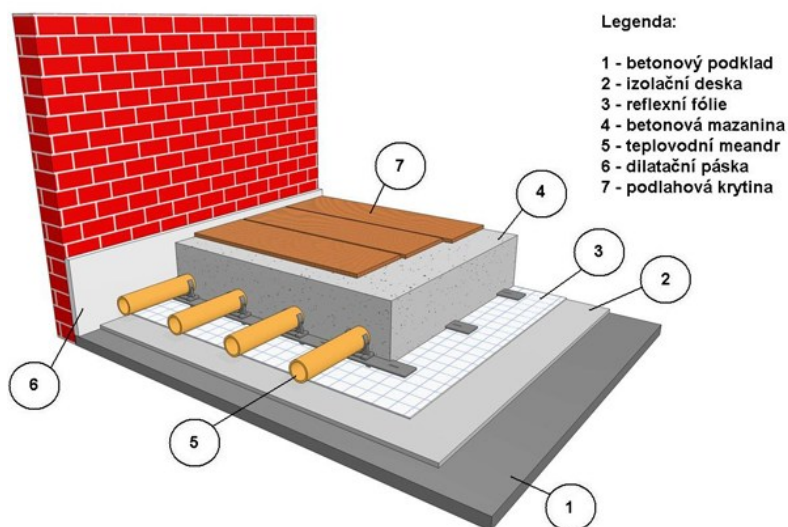
1.2.2 Teplovodní vytápění

Teplovodní vytápění je nejběžnější a nejpoužívanější systém vytápění. Teplonosné médium je zde voda, která je nahřívána na požadovanou teplotu, po té je samotížně nebo oběhovým čerpadlem dopravena potrubním systémem do otopných těles – obr. č. 1.2. V případě radiátorů se teplo předává prouděním vzduchu kolem teplosměnných ploch otopných těles a také sáláním teplosměnných ploch do okolí. Můžeme se rozhodnout i pro podlahové vytápění – obr. č. 1.3. Dnes je už běžné i stěnové vytápění, kdy je obdobný systém trubek nainstalován pod omítku zdi. V těchto případech se teplo předává velkoplošnými sálavými plochami. Teplo sálá z otopné plochy, která je tvořena svazky

otopných hadů, které jsou zabudovány ve stavebních konstrukcích (podlaha, stěna, strop) nebo mohou být ve formě závěsných panelů či pásů. Voda se vrací v uzavřeném okruhu zpět do teplovodního výměníku a koloběh se opakuje. [3]



Obr. č. 1.1.2: schéma teplovodního vytápění [http://archiv.sps-tabor.cz/attachment/sipvz_vytapeni.pdf]



Obr. č. 1.3: schéma podlahového topení
[http://www.rdtopeni.cz/_admin/files/userfiles/images/podlahove_topeni.png]

Výhody teplovodního vytápění:

- snadno regulovatelné ve zdroji i v místě spotřeby
- velká tepelná kapacita vody ($c_p, 20\text{ °C} = 4183\text{ J/(kgK)}$)
- voda je snadno dostupná, zdravotně nezávadná

- voda umožňuje nízké povrchové teploty otopných těles
- pokud se často nemění, nezpůsobuje velké ztráty koroze

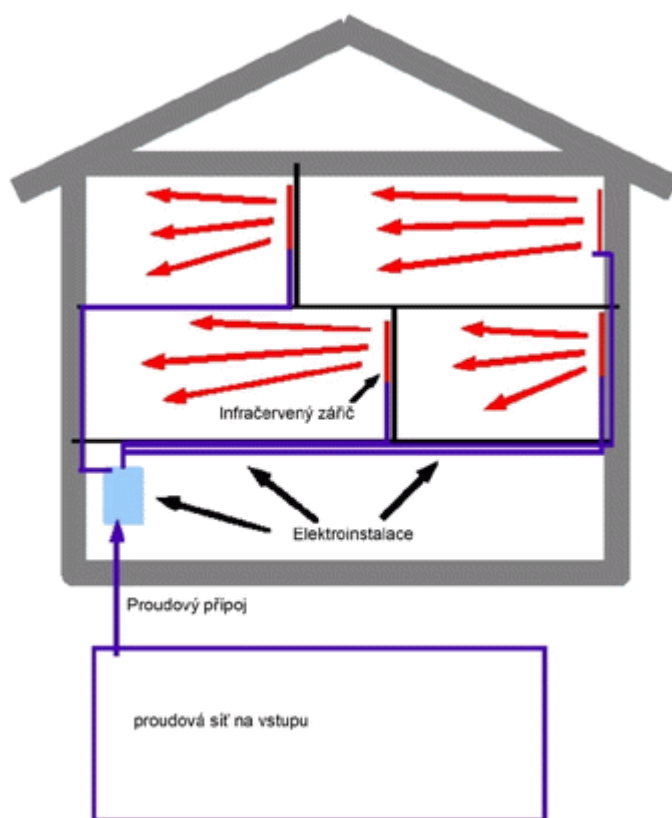
Nevýhody teplovodního vytápění:

- pomalé reakce na změnu klimatických podmínek
- nutné čerpadlo – závislost na dodávce el. energie
- možnost zamrznutí
- možnost havárie – vytopení domu[3]

1.2.3 Infračervené vytápění

Systém infračerveného vytápění má stejný tepelný efekt na ozářené předměty jako sluneční paprsky. Jeho využití má velmi široký záběr. Používá se v domácnostech v koupelnách, v obytných místnostech, v průmyslových halách, v kostelech a zámcích a poslední dobou se velmi rozšířilo i na restaurační předzahrádky, kde nám umožňují příjemné posezení venku i v chladném období. Ploché infračervené zářiče se upevní na stěny v místnostech podobně jako obrazy – obr. č. 1.4. Je možné je také umístit na strop. Infračervené vytápění je rovnocenná alternativa k běžným topným systémům. Přesto se na něj v normách a nařízeních přihlíží nedostatečně. Infračervený zářič může být elektrický nebo plynový. Novinkou jsou tzv. quartzová topidla, což jsou křemenné zářiče s parabolickými reflektory. Quartzové topidlo neohřívá vzduch, ale pouze předměty nebo osoby nacházející se v prostoru sálání. Vzduch se takto ohřívá až druhotně od předmětů, stěn nebo osob. U tohoto typu ohřevu není třeba předtápět prostor. Důsledkem je tolik žádaný okamžitý účinek po zapnutí.

Pro uživatele jsou důležité dvě věci: získaná tepelná pohoda a množství uspořené energie, které jsou u této možnosti vytápění na vysoké úrovni. Původně infračervené zářiče v místnosti nepůsobily příliš esteticky, byly umísťovány převážně v továrních prostorech a výrobních halách. Dnes se vyrábí v hezkých designech a modernímu prostoru lahodí.



Obr. č. 1.4: schéma infračerveného vytápění
[<http://vytapani.tzb-info.cz/docu/clanky/0080/008057o2.gif>]

Výhody infračerveného vytápění:

- malé investiční náklady
- žádné vedlejší náklady např. kominíci
- odpadá nutnost údržby
- má stoprocentně obnovitelný provoz
- okamžitý účinek po zapnutí
- nehlukný provoz

nevýhody infračerveného vytápění:

- nutnost vybavení zvláštním systémem větrání prostor (u plynových)
- systém nelze v létě využít k ochlazování vzduchu
- není možné použití infrazářičů (plynových) v hořlavém prostředí[5] [6]

1.3 Další rozdělení

Podle umístění topidla:

- místní (lokální) – přímo ve vytápěné místnosti např. krb, kamna
- etážové – vytápění jednoho bytu nebo patra v domě
- ústřední - výroba tepla z paliva + přenos teplonosnou látkou, získáváme teplo mimo vytápěnou místnost např. kotel ve sklepě
- dálkové vytápění - více objektů je vytápěno z jednoho topidla nebo systému topidel umístěných ve vzdálené kotelně nebo pomocí výměníku tepla

Podle zdroje tepla:

- spalování fosilních paliv
 - zemní plyn
 - dehtové oleje (benzín, topné oleje)
 - syntetické oleje (z ropy, uhlí)
 - kapalné plyny (propan – butan)
 - uhlí
- biomasa
 - polenové dřevo
 - brikety
 - dřevěné peletky
 - jiná biomasa
- elektřina
- dálkové teplo (CZT)
- solární kolektor
- tepelná čerpadla
 - vzduch
 - země
 - voda

Podle druhu topidla:

- krbová kamna
- tepelné čerpadlo
- kotel
- solární kolektor

Podle druhu otopného tělesa:

- Článeková otopná tělesa
 - Litinová článková tělesa
 - Ocelová článková
 - Hliníková článková tělesa
- Desková otopná tělesa
- Trubková tělesa
- Konvektory

2 Krb a kamna

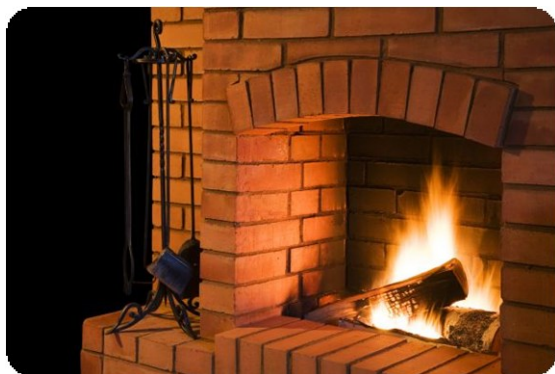
2.1 Historie

V minulosti byly krby a kamna jedinou využívanou technologií pro vytápění. Na venkově plnily krby několik funkcí. Vařilo se v nich, udilo se v nich maso a sýry, svítil a vyhříval. V druhé polovině devatenáctého a první polovině dvacátého století byl průmyslový rozvoj těchto spotřebičů. Ve venkovských domech byla typická kachlová kamna a sporáky. Ve městech se staly standartní výbavou mobilní sporáky – přenosné kachlové, litinové nebo ocelové. Při nedostatku palivového dřeva se přecházelo na uhlí a uhelné brikety. V meziválečném období byla široká nabídka topidel technicky už na vyšší úrovni a mnoho starých kamen z tohoto období funguje dodnes. Po druhé světové válce došlo k rozvoji centrálního zásobování teplem a plynofikace. Nabídka krbů a kamen se značně omezila. Později, při rozvoji staveb chat a chalup, došlo znova ke zvýšení obliby otevřených krbů a krbových kamen. A tento trend pokračuje i dnes. Nejdříve byly stávající otevřené krby opatřovány dvířky pro zamezení přístupu vzduchu a zvyšování účinnosti. Začaly se vyrábět a dovážet vložky i kamna. První výrobky byly neestetické. Chyběly vhodné výrobní technologie. V dnešní době se vývoj orientuje na účinnost spalování, ekologii spalování, používají se nové materiály a klade se důraz na estetiku. Krby a kamna jsou dnes spojovány s příjemnými zážitky u ohně, kde můžeme sledovat plápolající oheň a nechat se oslňovat jeho kouzlem a vychutnávat jeho hřejivé teplo. Můžeme si je umístit v rodinném domě i v bytě. Tyto symboly družnosti a pohody nejsou jen obyčejným zdrojem tepla, ale mohou se stát skutečným vytápěcím prostředkem. A to nejen jako doplňkový zdroj, ale i jako zdroj hlavní. [7] [8]

2.2 Krb

Krb je vytápěcí těleso s otevřeným ohništěm. Také se dá nazvat otevřeným spotřebičem, jelikož spotřebovává vzduch a palivo, vyrobí teplo a dým, které odvádí pryč. Je to nejstarší způsob vytápění. Klasický otevřený krb je jednoduché ohniště s malou účinností, jak ho známe ze starých hradů a zámků – obr. č. 2.1. Přední otevřenou stěnou se do místnosti předává sálavé teplo a zároveň do spalovacího prostoru vstupuje potřebný vzduch. Regulace tepelného výkonu je zde omezena pouze na množství paliva. Spotřeba dřeva je tedy při tomto způsobu vytápění značně vysoká. Velký objem vzduchu je z větší části nevyužit a odchází tzv. komínovou ztrátou. Při desetiprocentní účinnosti vidíme, že 9

z 10 polen, které přiložíme, se spálí bez užitku. Tento fakt vedl lidstvo k neustálému vymýšlení zlepšování účinnosti krbu, až se definitivně oddělila na důmyslná doplňková zařízení s vyššími účinnostmi krbu tak, jak je můžeme vidět dnes v moderních stavbách. Přesto jsou dnes krby stále využívány, hlavně jako interiérový doplněk např. v restauracích nebo i v moderních obytných místnostech, kde nám výrobci stále nabízejí širokou škálu provedení jako např. na obr. č. 2.2, kde je moderní centrální otevřený krb. Z praktických a bezpečnostních důvodů si před krby stavíme skleněné předstěny – obr. č. 2.3, aby nám praskající dřevo nepopálilo podlahu. Účinnost tím ale nijak neovlivníme.[7] [11]



Obr. č. 2.1: otevřený krb
[http://img.ceskyinternet.cz/clanky/odstavce/19336-537408-1_shutterstock_6760111.jpg]



Obr. č. 2.2: centrální krb
[<http://www.zivotnistyl.cz/admin/articlefiles/1990-otevreny-krb.jpg>]



Obr. č. 2.2: krb s předstěnou
[<http://media.novinky.cz/555/105559-original-ecndj.jpg>]

2.3 Kamna

Kamna jsou vytápěcí těleso, ve kterém je v průběhu hoření oheň uzavřený. Kominíci a hasiči považují kamna za uzavřený spotřebič. Mají dvířka v otvoru pro přikládání, která těsní a přívod vzduchu, který se dá plynule regulovat tak, aby ho bylo pouze nezbytné množství - většinou přes dvířka popelníku. Jejich konstrukce umožňuje velkou akumulaci tepla. Cíleně se obkládají materiály s vysokou tepelnou kapacitou jako je např. keramika. To nám umožňuje méně časté přikládání než do otevřeného krbu a ještě několikahodinové

příjemné vytápění místnosti. Pokud jsou kamna dostatečně roztopená, je výhodné přikládat méně často, jelikož už nejsou schopna přijmout více tepla ze spalín. Dá se říci, že u kamen platí pravidlo, že čím déle se nahřívají, tím déle hřejí. Příklad z praxe uvedu kamna „Petry“ – obr. č. 2.4, které jsou kovové se smaltovaným povrchem. Ty, když roztopíme, tak téměř okamžitě začnou sálát do okolí a vytápět studenou ložnici na chalupě. Po přiložení vydrží hřát 2 - 3 hodiny. Zatímco kachlová kamna v kuchyni – obr. č. 2.5 roztápíme skoro celý den, než začnou hřát, ale teplo potom udrží bez problémů celou noc do dalšího dne. Účinnost kamen se pohybuje kolem 70 %. Což je výrazně více než u otevřeného krbu. Spotřeba paliva nám tedy klesá při stejném tepelném výkonu. Abychom při zachování účinnosti nebyli ochuzeni o romantiku v podobě hořícího plamene, dají se dnes koupit kamna se skleněnou čelní stěnou nebo průzorem. [7] [11]



Obr. č. 2.4: kamna "Petry"
[http://www.24krby.cz/pic/catalog/detail/kerpen_h.jpg]



Obr. č. 2.3.5: kachlová kamna
[http://www.brana-bydleni.cz/sitewizard/km_uploads/mediumsize/kachlova-kamna-41b3.jpg]

2.4 Krbová kamna

Největší rozmach zaznamenávají krbová kamna. Jde o hotový výrobek, který je běžně v obchodech k dostání a doma umožňuje, narozdíl od krbů a kachlových kamen, poměrně snadnou instalaci. Dle grafu č. 2.1 vidíme, že krbová kamna jsou zřetelně na prvním místě v žebříčku oblíbenosti. Bývají převážně lehké kovové konstrukce. Avšak i u nich je možnost zvýšit akumulační schopnost kamenným nebo keramickým obkladem. Umožňují nám propojit vizuální zážitek z otevřeného ohně s vysokou účinností a nízkou spotřebou paliva. Lze s nimi poměrně rychle vytopit chladnou místnost. Přes skleněná dvířka získáme větší množství sálavého tepla než přes ocelový svařenec, případně obklad “obyčejných” kamen. Konstrukční a designérská tvořivost je zde téměř neomezena a nabídka uspokojí každého

zákazníka– obr. č. 2.6 a č. 2.7. Provozování krbových kamen je spolehlivé a bezpečné a v neposlední řadě i cenově výhodnější v porovnání s ostatními možnostmi. [11]



Obr. č. 2.46: krbová kamna 1
[http://www.krbova-kamna.cz/images/produkty/39_titul.jpg]



Obr. č. 2.47: krbová kamna 2
[http://www.eedilkamin.cz/teplovodni-kamna-na-drevo_soubory/image001.gif]

Významným pokrokem jsou automatická krbová kamna. Na českém trhu se objevila ve větším počtu až v r. 2009. Jedná se o spotřebič s minimálními nároky na obsluhu. Kamna mají elektronickou řídicí jednotku, která zajišťuje automatický provoz s regulací výkonu dle teploty v prostoru. Ovládání je zajištěno grafickým displejem. U některých modelů je dokonce možné dálkové ovládání kamen přes internet. Palivo je z vestavěného zásobníku automaticky podáváno do spalovací komory. Přívod spalovacího vzduchu a odvod spalin je zajištěn ventilátory. V takovýchto krbových kamnech je možné spalovat biomasu, jako jsou pelety, obilí, štěpka, nebo i uhlí. Vidíme tedy, že způsob spalování v malých ohništích pro vytápění se dá neustále zdokonalovat a zlepšovat. [12]

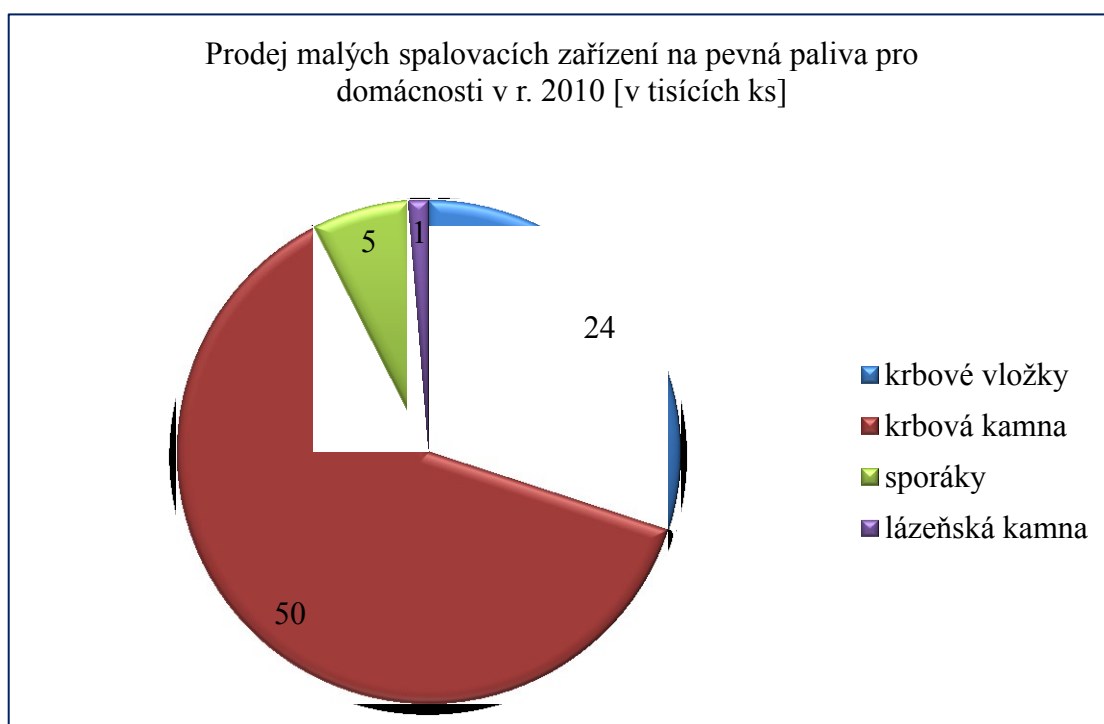
2.4.1 Bezpečnost provozování krbových kamen

Při instalaci krbových kamen je důležité dodržet nespočet bezpečnostních předpisů. Většina výrobců trvá na připojení kamen odborníkem, což může být topenář, kamnář nebo kominík.

- Při umístění kamen v prostoru je třeba dbát na minimální bezpečné vzdálenosti od předmětů, které se dělí podle třídy hořlavosti
- Musíme dodržet zásady požární ochrany obsažené v ČSN 06 1008
- Kamna můžeme připojit pouze na komín s určitým tahem – souhlas musí vydat příslušné kominické středisko a musí splňovat podmínky z vyhlášky 268/2009,

nařízení vlády 91/2010; 146/207, ČSN 734201/2010, ČSN EN 1443; 15287-1; 15287-2; 1856-1; 1856-2; 1457.

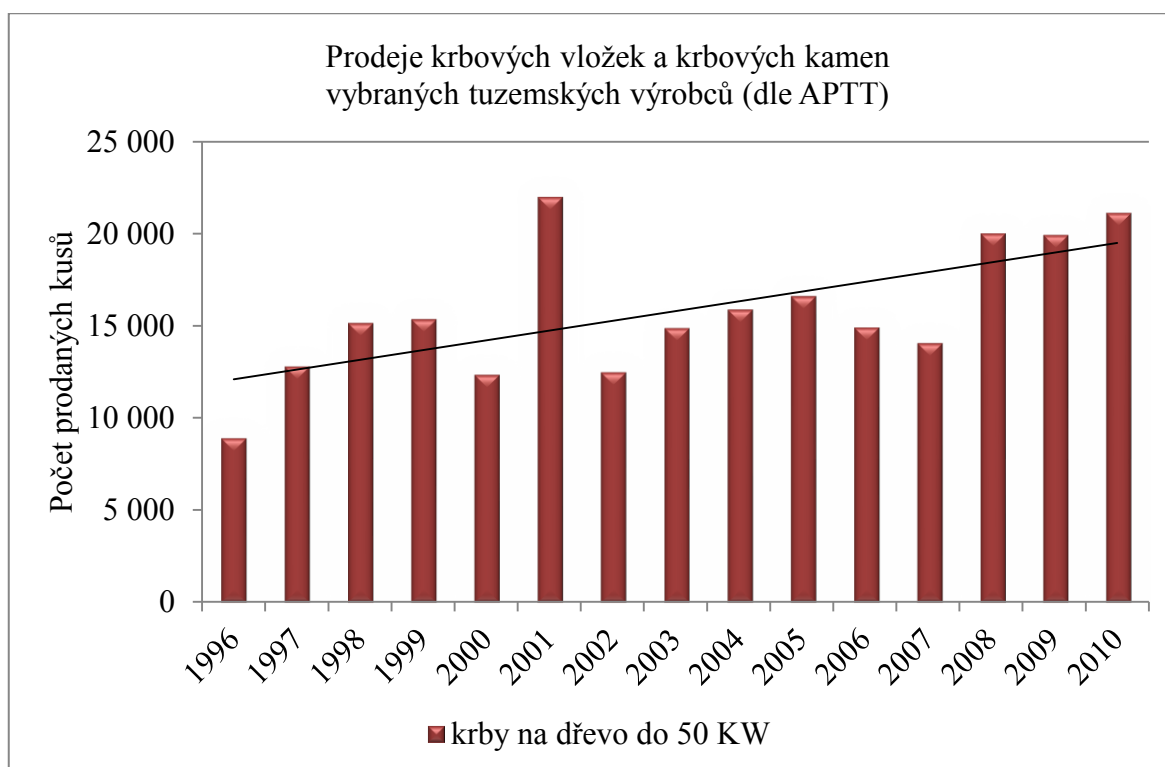
- Pokud máme v místnosti, kde jsou krbová kamna umístěna, vyměněná nová okna, která dobře těsní, je nutné vytvořit dodatečný přívod čerstvého vzduchu průřezem minimálně 200 cm^2 .
- V kamnech smíme topit pouze palivem, které je k tomu určené
- V případě, že máme hořlavou podlahu, je nutné pod kamna umístit dostatečně velký nehořlavý plech
- Krbová kamna se doporučují čistit minimálně 1 x ročně.[13]



Graf č. 2.1: Prodej malých spalovacích zařízení v r. 2010[8]

2.5 Současnost

Z článku Ing. Aleše Bufky [8] jsem se dozvěděla několik statistických údajů. Například, že v r. 2010 bylo na náš trh dodáno více než 80 tisíc malých spalovacích zařízení na pevná paliva. Viz graf č. 2.1.15 – 20 % spotřebičů z celkového počtu bylo osazeno teplovodními výměníky, kterými se budu dále zabývat. V posledních 20 letech bylo instalováno přes 700 tisíc krbových kamen a vložek a 50 - 60 tisíc z nich byla teplovodní zařízení. V grafu č. 2.2 jsem zpracovala dle údajů Asociace podniků topenářské techniky, jaký byl prodej krbových kamen a vložek v České republice v letech 1996 – 2010, což zde zahrnuje pojem „krby na dřevo“.



Graf č. 2.2: Prodej krbových kamen a vložek v letech 1996-2010[8]

Díky dokonalejšímu spalování jsou krbová kamna šetrnější k životnímu prostředí. Moderní krbová kamna mají velmi nízké hodnoty emisí tuhých částic. To způsobilo, že v roce 2009 byly krbová kamna a krbové vložky poprvé uvedeny v žádostech o podporu Státního fondu životního prostředí. Když se otevřel program Zelená úsporám, kde se o tyto spotřebiče dalo také žádat, masivně stoupl počet žádostí. Tyto programy jsou snahou o zlepšení ovzduší zvláště v krajích, kde jsou emisní limity dlouhodobě překračovány. Vkládám zde přehled žádostí podle roku instalace a druhu spotřebiče – tabulkač. 2.1 [8]

Počet žádostí o podporu dle předpokládaného roku realizace a technologie					
rok realizace	krbové vložky na dřevo	krbové vložky na pelety	krbová kamna na dřevo	krbová kamna na pelety	celkem
2007	0	0	2	2	4
2008	0	0	3	1	4
2009	1	0	4	4	9
2010	231	0	64	254	549
2011	40	0	22	138	200
celkem	272	0	95	399	766

Tabulka č. 2.1: Počet žádostí o podporu Státního fondu živ. prostředí[8]

3 Výměníky

Výměníky tepla jsou jedny z nejstarších a nejrozšířenějších zařízení. Mají velký význam pro tepelnou energetiku, teplárenství, chemický průmysl, hutnictví i jiná odvětví. Jejich využití je velmi široké. Používáme je u vytápění, chlazení, ohřevu vody, u tepelných čerpadel, solárních systémů, u ohřevu bazénů, v průmyslových aplikacích, pro chlazení olejů, v tepelných elektrárnách (výparník parního kotle, přehřívák, spalínový ohřívák vody, vzduchu, kondenzátor, chladicí věž) atd. Mohou tvořit hlavní funkční prvek nebo umožnit efektivnější využití tepelných zařízení.

Princip tepelného výměníku je jednoduchý. Jsou to zařízení, která umožňují průběžně nebo přerušovaně výměnu tepla mezi dvěma tekutinami o nestejně teplotě. Tedy mezi kapalinou a kapalinou, kapalinou a plynem nebo dvěma plyny. Zřejmě nejznámější příklad je radiátor ústředního topení, kde z nízkotlakého teplovodního okruhu je předáváno teplo do prostředí místnosti. Jde tedy o výměnu mezi kapalinou a plynem.

3.1 Rozdělení výměníků

podle změny skupenství

- Beze změny skupenství - kdy olej zůstává olejem, voda vodou, vzduch vzduchem.
- Se změnou skupenství - kde dojde například ke kondenzaci páry na kapalinu nebo naopak z vody se stane pára.

podle pracovního principu

- povrchové – obě tekutiny oddělené, k předání tepelné energie dochází povrchem výměníku
- rekuperační - teplejší a chladnější tekutina jsou od sebe odděleny pevnou stěnou, jsou v průmyslu nejrozšířenější
 - souproudé
 - protiproudé
 - s jednoduchým křížovým proudem
- regenerační - teplejší a chladnější tekutina za sebou opakovaně s časovým zpožděním omývá teplosměnný povrch; chladnější médium přijímá teplo

z povrchu dříve přivedené teplejším médiem; např. ohříváky vzduchu a plynu vysokých pecí

- kontaktní – obě tekutiny jsou v určitém prostoru a čase zároveň, ale chemicky spolu nereagují, takže se dají od sebe znova oddělit; teplosměnná plocha je rozhraní obou médií
- směšovací - dochází ke smíšení obou tekutin bez opětovného rozdělení např. ohřev vody horkou párou; teplosměnná plocha je dána povrchem kapek vstříkované vody

podle způsobu použití

ohříváky; chladiče; výparníky; kondenzátory; přehříváky; parní generátory; termické odplyňovávky vody; topná tělesa ústředního topení

podle způsobu sdílení tepla

- konvekční výměník –většina přenosu tepla se děje prouděním tekutin
- radiační výměník - většina tepla se předává sáláním
- kombinovaný výměník - poměr výše uvedených sdílení je vyrovnán

podle způsobu proudění teponosných médií

- bez jednoznačného proudění – u výparníků nebo parních generátorů, kde je udržována konstantní výška hladiny vody bez ohledu na proudění vody
- s gravitačním stékáním –kondenzát vzniklý z páry nebo horká kapalina stékají vlastní tíhou přes trubky, ve kterých proudí chladící médium
- s přirozenou cirkulací – u výparníků je toho docíleno rozdílnými hustotami vody při různých tlacích a teplotách tj. voda vlastní tíhou klesá, dokud se nenahřeje a v podobě páry se vrací do zásobníku
- s nuceným oběhem – pomocí čerpadla nebo kompresoru
- s nuceným průtokem – ohřívání médium se nevrací, pouze proteče; u průtočného výparníku kotle

podle směru proudění

- souproudé – obě média proudí stejným směrem
- protiproudé – každá z tekutin proudí směrem opačným
- křížové – osy proudů spolu svírají pravý úhel
- šikmé – osy proudů spolu svírají méně nebo více než pravý úhel
- kombinované - například vícenásobné proudění nebo kombinace výše uvedených druhů

podle konstrukčního řešení

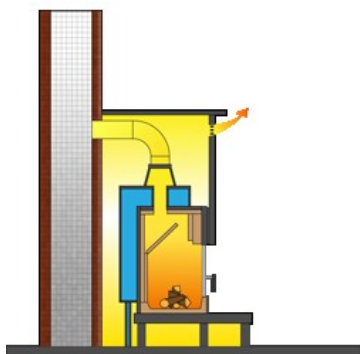
bubnové; skříňové; deskové; trubkové; svazkové; šroubové; hadové; žebrové; a další

podle teplonosných medií

- v tepelné energetice: voda – voda; pára – pára; pára – voda; pára – vzduch; pára – olej; spaliny – voda; spaliny – pára; spaliny – vzduch;
- v chladicí technice: R134a, R401a, R404a, R407c, R410a, čpavek atd.[9][10]

3.2 Výměník pro krbová kamna

Teplovodní výměník na krbových kamnech nám zajišťuje ohřev vody, kterou můžeme využít v teplovodním systému k vytápění domu, případně také pro ohřev teplé vody. V této práci se budu zabývat výměníkem, který bude sloužit k nahřívání vody do topení. I zde může být více variant. A to výměník zabudovaný ve spalovacím prostoru– obr. č. 3.1 nebo spalinový výměník umístěný dále na kouřovodu– obr. č. 3.2. Jeopět možná kombinace obojího. Výměník můžeme instalovat dodatečně. Někteří výrobci jej prodávají jako příslušenství ke svým krbovým kamnům– obr. 3.3 nebo si ho můžeme nechat vyrobít na míru v kovovýrobním závodě např. z nerez. Běžnější je koupit teplovodní výměník už jako součást krbových kamen přímo od výrobce. Jmenovitý výkon krbových kamen je součet výkonu tepelného toku do místnosti a tepelného toku do výměníku. Já se budu snažit o výměník, který má výkon 5 kW do vody. Celkový výkon kamen však bude vyšší. Protože samotné těleso kamen má tepelný výkon přibližně 4 kW. Kdybychom dosáhli celkového výkonu 9 kW, byli bychom schopni vytopit prostor přibližně 200 m³.



Obr. č. 3.2: výměník ve spalovacím prostoru
[<http://www.krbynej.cz/soubory/krb-5.png>]



Obr. č. 3.1: výměník v kouřovodu
[<http://www.rolf.cz/portals/67/sys41/fotoShort/1474.png>]



Obr. č. 3.3: výměník místo zadní stěny krbových kamen
[http://www.krbovakamna.com/produkty/stredni/s1332_vymenik_odense.jpg]

3.2.1 Zapojení teplovodního výměníku

Pokud krbová kamna s výměníkem budeme zapojovat do již stávajícího topného systému např. s elektrickým kotlem, je nutné je zapojit paralelně. Já budu můj výměník řešit jako hlavní a jediný zdroj tepla. V systému musíme mít připojené vstupní a výstupní ventily, odvzdušňovací ventily a kohouty před a za čerpadlem a krbovými kamny, abychom mohli provést případné odstavení či výměnu.

Před krbovými kamny umístíme oběhové čerpadlo, které nám bude zajišťovat proudění v našem systému. To se bude spouštět ve chvíli, kdy dostane signál od termostatu, že je voda, která vychází z výměníku dostatečně nahřátá. Termostat se tedy umístí co nejbližší za výměníkem. Ještě je třeba co nejbližší ke kamnům instalovat samoodvzdušňovací ventil,

kterým se upouští přebytečný vzduch. Za termostatem je nutné mít na vedení pojistný tlakový ventil, který v případě havárie při zvýšení tlaku vypustí horkou vodu nebo páru ven, aby nic nepopraskalo.

Do výměníku nám musí vtékat voda minimálně o teplotě 55 °C, abychom předešli kondenzování spalin a tím zanášení výměníku a kouřovodu. Nejlepším způsobem, jak toho docílit je instalování tzv. bypassu, což je samostatný okruh kolem výměníku s třícestným ventilem. Ten zajišťuje vracení teplé vody do výměníku tak dlouho, dokud nemá požadovanou minimální teplotu, teprve potom ji vpouští do otopných těles.[13]

3.2.2 Bezpečnost provozování teplovodního výměníku

Řádné zapojení teplovodního výměníku do okruhu ústředního vytápění je velmi důležité. Dosáhneme tím správného fungování, dlouhé životnosti výměníku a hlavně bezpečného provozu. Vztahuje se k tomu několik bezpečnostních předpisů. Je zde nutná instalace patřičně oprávněnou osobou podle projektu, který byl vyhotoven taktéž odborně způsobilým člověkem.

Hlavní zásady

- Musíme zajistit odběr tepla z teplovodního systému minimálně o jmenovitém výkonu
- Při poruše se nesmí otopná voda nahřát nad 110 °C
- Nesmí dojít k zastavení průtoku vody výměníkem, pokud se topí
- Teplovodní výměník musíme pravidelně min. 1x za 3 měsíce očistit od sazí a nečistot
- Je třeba dodržet ustanovení ČSN 06 0830 - Zabezpečovací zařízení pro ústřední vytápění a ohřev teplé užitkové vody, ČSN 06 0310 - Ústřední vytápění, projektování a montáž, ČSN 06 0320 - Ohřívání užitkové vody, navrhování, projektování, Technická pravidla H131 96 vydaná cechem topenářů a instalatérů [13]

4 Stechiometrické výpočty

Spalovací proces je oxidace hořlaviny v palivu vzdušným kyslíkem. Při oxidačních reakcích se uvolňuje teplo, kterému odpovídá množství chemicky vázané energie, která je v hořlavině obsažena. Čím je rychlost oxidační reakce větší, tím získáme větší množství uvolňovaného tepla. Abychom mohli mluvit o hoření, je třeba, aby se objevil plamen.

Hmotové složení tuhého paliva představuje vzájemný poměr hořlaviny, popeloviny a vody.

$$h + A + W = 1 \quad [1] \quad (1)$$

Tento hrubý rozbor paliva sezjišťuje následovně: Obsah vody budeme znát po dokonalém vysušení paliva, po té nám hořlavinu vyjádří úbytek hmotnosti po spálení a zbytek nám tvoří popelovina. Ve dřevě je obsah popeloviny, kterou představují anorganické látky, vždy velmi nízký. Zpravidla nepřekračuje 1 %. Hořlavina je nejvýznamnější složkou paliva a představují ji prvky C, H, S, N a O. Energie je vázána pouze na uhlík, vodík a síru, kterou v případě dřeva zanedbáváme. [11]

Nejprve musím vypočíst stochiometrické spalování, což jsou výpočty, které předpokládají vyhoření všech spalitelných složek paliva a tedy se nevyskytuje žádná z nich ve spalinách. Začnu s teoretickým spalováním, kde je počítáno s minimálním množstvím vzduchu, a jelikož ve skutečnosti se palivo spaluje ve spotřebičích s větším množstvím vzduchu, než je teoretický objem, následně tedy přepočítám výpočty pro spalování s přebytkem vzduchu. Vzorce, podle kterých budu v této kapitole počítat jsme použili z normy ČSN 07 0302 [14].

4.1 Výchozí hodnoty

Když si koupíme dřevo od dodavatele, nebo si ho sami natěžíme v lese, má v sobě velmi vysoké procento vody – přibližně 50 %. Je třeba ho správným uskladněním nebo technologií vysušit na co nejmenší možnou míru. Já budu počítat s palivem, které je vysušeno na 20 % vlhkosti, což odpovídá obsahu vlhkosti po 2 letech přirozeného schnutí.

Cílem je mít dřevo s co největším energetickým obsahem.

$$W = 20 \%$$

$$C = 43 \%$$

$$H = 4,5 \%$$

$$N = 0,1 \%$$

$$O = 32,2 \%$$

$$A = 0,2 \%$$

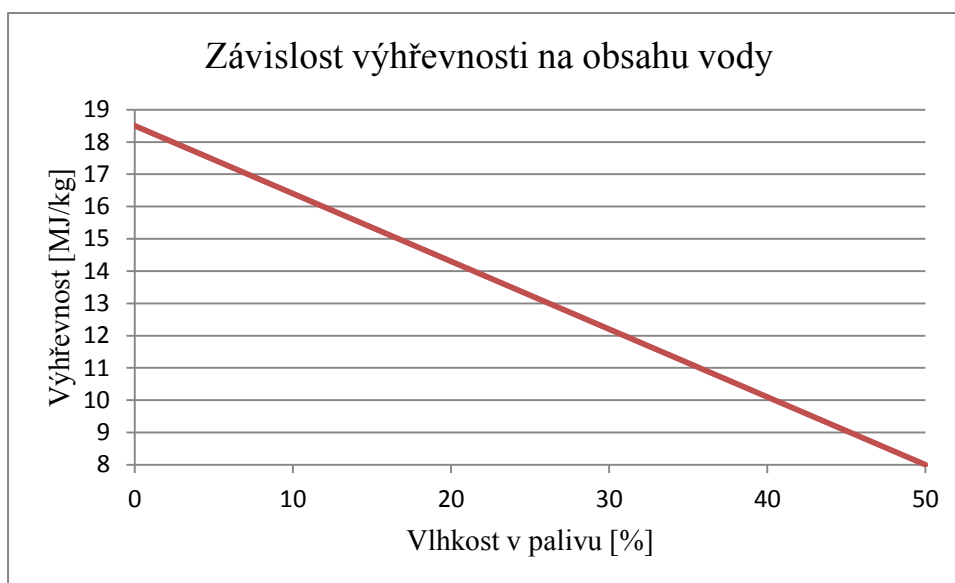
Dosazením do rovnice č. (1) si můžu ověřit, že platí rovnice hrubého rozboru:

$$0,798 + 0,002 + 0,2 = 1$$

Při spalování v krbových kamnech výrobci uvádějí přebytek spalovacího vzduchu mezi 2 – 4. Závisí to na konkrétním typu kamen a nakolik máme otevřené přívody primárního a sekundárního vzduchu. Já si volím hodnotu 3.

$$n = 3$$

Výhřevnost paliva jsem odečetla z grafu č. 4.1. Pro obsah vlhkosti v palivu 20 %.



Graf č. 4.1: Závislost výhřevnosti na obsahu vody ve dřevě[11]

$$Q_i = 14,50 \text{ MJ/kg} = 14500 \text{ kJ/kg}$$

Požadovaný výkon teplovodního výměníku mám zadáný

$$Q_{\text{vym}} = 5 \text{ kW}$$

Při běžných klimatických podmínkách, kdy relativní vlhkost vzduchu je 70 % a teplota vzduchu 20 °C, můžu koeficient vlhkosti zvolit

$$v = 1,016$$

Koeficient vlhkosti představuje objem vlhkého vzduchu obsahující 1 m³ suchého vzduchu.

Teplota vody vstupující a vystupující z výměníku je odvozena z běžné topenářské praxe. Je přizpůsobena tak, abychom měli co nejdelší životnost výměníku a zároveň udrželi požadovaný výkon teplovodní vložky.

$$t_{1v} = 75 \text{ °C}$$

$$t_{2v} = 60 \text{ °C}$$

4.2 Stechiometrické objemy vzduchu a spalin

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{vz,t^s} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left(\frac{C}{12,011} + \frac{H}{4,032} - \frac{O}{32} \right) \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (2)$$

$$V_{vz,t^s} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left(\frac{0,43}{12,011} + \frac{0,045}{4,032} - \frac{0,322}{32} \right) = 3,943 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

Kde	C	obsah uhlíku v surovém palivu	[1]
	H	obsah vodíku v surovém palivu	[1]
	O	obsah kyslíku v surovém palivu	[1]

Objem spalin, které vzniknou z dokonalého spálení 1kg dřeva

$$V_{sp,t^s} = \frac{22,26}{12,011} C + \frac{22,4}{28,016} N + 0,7905 \cdot V_{vz,t^s} \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (3)$$

$$V_{sp,t^s} = \frac{22,26}{12,011} 0,43 + \frac{22,4}{28,016} 0,001 + 0,7905 \cdot 3,943 = 3,915 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

Kde	C	obsah uhlíku v surovém palivu	[1]
	N	obsah dusíku v surovém palivu	[1]
	V_{vz,t^s}	objem suchého teoretického vzduchu z rce č. (2)	$[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$

Objem vodní páry ve spalinách

$$V_{H_2O,t} = 11,1111H + 1,2433W + (v - 1) \cdot V_{vz,t^s} \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (4)$$

$$V_{H_2O,t} = 11,1111 \cdot 0,045 + 1,2433 \cdot 0,2 + (1,016 - 1) \cdot 3,943 = 0,812 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

Kde	H	obsah vodíku v surovém palivu	[1]
	W	obsah vody v surovém palivu	[1]
	v	koeficient vlhkosti	[1]
	V_{vz,t^s}	objem suchého teoretického vzduchu z rce č. (2)	$[m^3_n/kg]$

Objem vlhkých spalin při dokonalém spálení 1 kg paliva

$$V_{sp,t^v} = V_{sp,t^s} + V_{H_2O,t} \quad [m^3_n/kg] \quad (5)$$

$$V_{sp,t^v} = 3,915 + 0,812 = 4,727 m^3_n/kg$$

Kde	V_{sp,t^s}	objem suchých teoretických spalin z rce č. (3)	$[m^3_n/kg]$
	$V_{H_2O,t}$	objem teoretické vodní páry z rce č. (4)	$[m^3_n/kg]$

4.3 Nadstechiometrické objemy vzduchu a spalin

Skutečný objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{vz,s^s} = V_{vz,t^s} \cdot n \quad [m^3_n/kg] \quad (6)$$

$$V_{vz,s^s} = 3,943 \cdot 3 = 11,830 m^3_n/kg$$

Kde	V_{vz,t^s}	objem suchého teoretického vzduchu z rce č. (2)	3,943	$[m^3_n/kg]$
	n	přebytek vzduchu	[1]	

Skutečný objem vlhkého vzduchu potřebný k dokonalému spálení 1 kg paliva

$$V_{vz,s^v} = V_{vz,s^s} \cdot v \quad [m^3_n/kg] \quad (7)$$

$$V_{vz,s^v} = 11,830 \cdot 1,016 = 12,020 m^3_n/kg$$

Kde	V_{vz,s^s}	objem suchého skutečného vzduchu z rce č. (6)	$[m^3_n/kg]$
	v	koeficient vlhkosti	[1]

Objem suchých spalin skutečných při spálení 1 kg dřeva

$$V_{sp,s^s} = V_{sp,t^s} + (n - 1) \cdot V_{vz,t^s} \quad [m^3_n/kg] \quad (8)$$

$$V_{sp,s^s} = 3,915 + (3 - 1) \cdot 3,943 = 11,802 m^3_n/kg$$

Kde	V_{sp,t^s}	objem suchých teoretických spalin z rce č. (3)	$[m^3_n/kg]$
	n	přebytek vzduchu	[1]
	V_{vz,t^s}	objem suchého teoretického vzduchu z rce č. (2)	$[m^3_n/kg]$

Skutečný objem vodní páry ve spalinách

$$V_{H_2O,s} = V_{H_2O,t} + (n - 1) \cdot (v - 1) \cdot V_{vz,t^s} \quad [m^3_n/kg] \quad (9)$$

$$V_{H_2O,s} = 0,812 + (3 - 1) \cdot (1,016 - 1) \cdot 3,943 = 0,938 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

Kde	$V_{H_2O,t}$	objem teoretické vodní páry z rce č. (4)	$[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$
	n	přebytek vzduchu	[1]
	u	koefficient vlhkosti	[1]
	V_{vz,t^s}	objem suchého teoretického vzduchu z rce č. (2)	$[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$

Objem vlhkých spalin skutečných při spalení 1 kg dřeva

$$V_{sp,s^v} = V_{sp,s^s} + V_{H_2O,s} \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (10)$$

$$V_{sp,s^v} = 11,802 + 0,938 = 12,740 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

Kde	V_{sp,s^s}	objem suchých skut.spalin z rce č. (8)	$[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$
	$V_{H_2O,s}$	objem skutečné vodní páry z rce č. (9)	$[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$

Objemy jednotlivých prvků ve spalinách z paliva při skutečném spalování

$$V_{CO_2,p,s} = \frac{22,26}{12,011} C \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (11)$$

$$V_{CO_2,p,s} = \frac{22,26}{12,011} 0,43 = 0,797 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

Kde	C	obsah uhlíku v surovém palivu	[1]
-----	---	-------------------------------	-----

$$V_{N_2,p,s} = \frac{22,4}{28,016} N \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (12)$$

$$V_{N_2,p,s} = \frac{22,4}{28,016} 0,001 = 0,001 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

Kde	N	obsah dusíku v surovém palivu	[1]
-----	---	-------------------------------	-----

Objemy jednotlivých prvků ve spalinách ze vzduchu při skutečném spalování

$$V_{CO_2,vz,s} = 0,0003 \cdot V_{vz,s^s} \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (13)$$

$$V_{CO_2,vz,s} = 0,0003 \cdot 11,830 = 0,004 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

$$V_{N_2,vz,s} = 0,7809 \cdot V_{vz,s^s} \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (14)$$

$$V_{N_2,vz,s} = 0,7809 \cdot 11,830 = 9,238 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

$$V_{Ar,vz,s} = 0,0093 \cdot V_{vz,s^s} \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (15)$$

$$V_{Ar,vz,s} = 0,0093 \cdot 11,830 = 0,110 \text{ m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

Kde	V_{vz,s^s}	objem suchého skutečného vzduchu z rce č. (6)	$[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$
-----	--------------	---	-------------------------------------

Objem složek ve spalinách, které vzniknou navíc – oproti dokonalému – při nadstechiometrickém spalování

$$V_{CO,s} = \frac{22,41}{12,011} C \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (16)$$

$$V_{CO,s} = \frac{22,41}{12,011} 0,43 = 0,802 \text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

$$V_{O_2,s} = \frac{22,39}{12,011} C \quad [\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}] \quad (17)$$

$$V_{O_2,s} = \frac{22,39}{12,011} 0,43 = 0,802 \text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}$$

Kde C obsah uhlíku v surovém palivu [1]

4.4 Koncentrace jednotlivých složek ve spalinách

$$\omega_i = \frac{V_i}{V_{sp,s^v}} \quad [1] \quad (18)$$

Dosažením součtů objemů jednotlivých složek spalin do vzorce č. (18) získám koncentraci každé z nich:

$$\omega_{N_2} = \frac{V_{N_2,p,s} + V_{N_2,vz,s}}{V_{sp,s^v}} = \frac{0,001 + 9,238}{12,740} = 0,725$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O,s}}{V_{sp,s^v}} = \frac{0,938}{12,740} = 0,074$$

$$\omega_{CO} = \frac{V_{CO,s}}{V_{sp,s^v}} = \frac{0,802}{12,740} = 0,063$$

$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2,s}}{V_{sp,s^v}} = \frac{0,802}{12,740} = 0,063$$

$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2,p,s} + V_{CO_2,vz,s}}{V_{sp,s^v}} = \frac{0,797 + 0,004}{12,740} = 0,063$$

$$\omega_{Ar} = \frac{V_{Ar,vz,s}}{V_{sp,s^v}} = \frac{0,110}{12,740} = 0,009$$

Kde $V_{N_2,p,s}$ objem dusíku ze dřeva ze vzorce č. (12) $[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$
 $V_{N_2,vz,s}$ objem dusíku ze vzduchu ze vzorce č. (14) $[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$
 $V_{H_2O,s}$ objem skutečné vodní páry ze vz. č. (9) $[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$
 $V_{CO,s}$ objem oxidu uhelnatého ze vz. č. (16) $[\text{m}^3_{\text{n}}/\text{kg}]$

$V_{O_2,s}$	objem kyslíku ze vzorce č. (17)	$[m^3_n/kg]$
$V_{CO_2,p,s}$	objem oxidu uhličitého z paliva ze vz. č. (11)	$[m^3_n/kg]$
$V_{CO_2,vz,s}$	objem oxidu uhličitého ze vzduchu ze vz. č. (13)	$[m^3_n/kg]$
$V_{Ar,vz,s}$	objem argonu ze vzduchu ze vz. č. (15)	$[m^3_n/kg]$
V_{sp,s^v}	objem skutečných vlhkých spalin za va. č. (10)	$[m^3_n/kg]$

Správnost výpočtu jsem si ověřila součtem jednotlivých koncentrací, které musí dávat dohromady 100 % tj hodnotu 1.

$$\sum \omega_i = 0,996 \sim 1$$

5 Návrh teplovodního výměníku

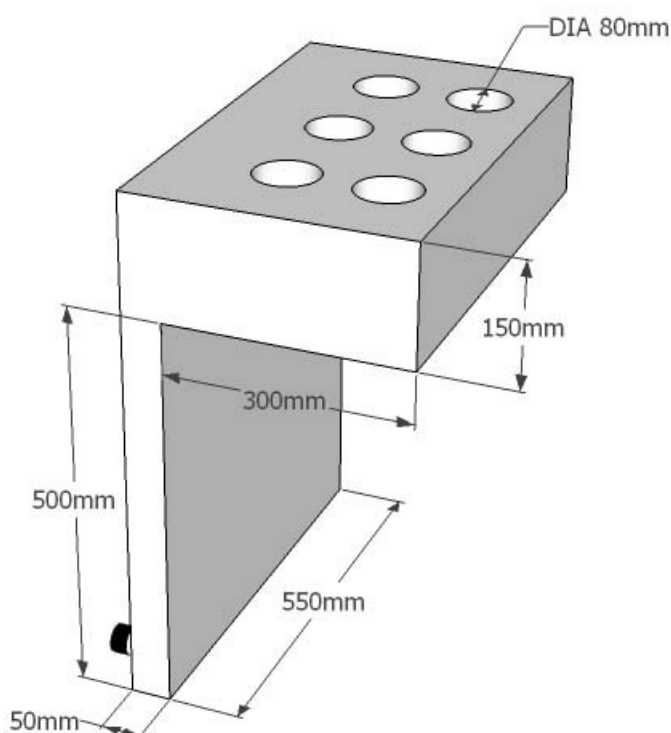
5.1 Volba materiálu, typu konstrukce a rozměrů výměníku

Navrhuji výměník, který bude umístěn na zadní straně spalovací komory krbových kamen a částečně bude zasahovat i nad ní. Ve vrchní části bude 6 trubkových průduchů pro průchod spalín dále do kouřovodu. Vstupní voda bude přiváděna ventilem v dolní části výměníku. Výstupní ventil bude v protilehlém rohu zadní stěny výměníku. Tím bude zajištěno proudění chladnější vody směrem vzhůru. A v horní části výměníku dosáhnou nuceného proudění pomocí vodorovné přepážky.

Jako materiál jsem zvolila ocelové nerezové plechy o tloušťce 4 mm a ocelové trubky o průměru 80 mm. Úpravu oceli jsem zvolila nerez tak, aby materiál odolával jak vysokým teplotám spalín i korozi na straně vody.

Všechny postupy v této kapitole jsou čerpány z literatury č. [15].

Základní rozměry navrhované teplosměnné plochy výměníku



Obr. č. 5.1: navrhované rozměry výměníku

5.2 Výpočet teploty spalin ve spalovací komoře

Vstupní a výstupní entalpie

Budu uvažovat, že výměník bude mít 100% účinnost. Platí tedy tepelná bilance mezi výhřevností paliva, entalpií vzduchu a entalpií paliva na straně jedné a entalpií spalin na straně druhé.

$$Q_i + i_{pal} + i_{vz} = i_{spal} \quad [\text{kW}] \quad (19)$$

Entalpie je součet vnitřní a vnější energie a počítáme ji jako násobek množství, měrné tepelné kapacity a rozdílu teplot. Rozdíl teplot počítám jako absolutní hodnotu rozdílu teploty za normálních podmínek a teploty dané veličiny. Dosazením do rovnice č. (19) získám tedy následující rovnici, ze které si následně vyjádřím teplotu spalin ve spalovacím prostoru.

$$Q_i + c_{ppal} \cdot \Delta t_{pal} \cdot V_{pal} + c_{pvz} \cdot \Delta t_{vz} \cdot V_{vz,s^v} = c_{psp} \cdot \Delta t_{sp} \cdot V_{sp,s^v} [\text{kW}] \quad (20)$$

Měrná tepelná kapacita vzduchu

Měrnou tepelnou kapacitu vzduchu určím pomocí tabulky Měrná tepelná kapacita vzduchu – viz. příloha č. 1. Pro teplotu vzduchu 20 °C. Interpolací najdu požadovanou hodnotu.

$$t_{vz} = 20 \text{ °C} \sim \Delta t_{vzd} = 20$$

$$c_{pvz} \text{ pro } 0 \text{ °C} = 1,297 \text{ kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K})$$

$$c_{pvz} \text{ pro } 100 \text{ °C} = 1,306 \text{ kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K})$$

$$c_{pvz} \text{ pro } 20 \text{ °C} = 1,299 \text{ kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K})$$

Měrná tepelná kapacita dřeva

Měrnou tepelnou kapacitu paliva jsem vyhledala z tabulky Měrné tepelné kapacity pevných látek při teplotě - viz příloha č. 2. Teplotu dřeva volím stejnou jako teplotu vzduchu.

$$t_{pal} = 20 \text{ °C} \sim \Delta t_{vzd} = 20$$

$$c_{ppal} = 2,390 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Měrná tepelná kapacita spalín - odhad

Pro měrnou tepelnou kapacitu spalín musím zjistit střední měrné tepelné kapacity jednotlivých složek spalín. Použila jsem k tomu tabulku Měrná tepelná kapacita plynů za stálého tlaku viz. příloha č.3. Zatím neznám teplotu spalín, tak zkusmo zkusím vyhledat hodnoty pro 300°C, které odpovídají teplotě spalín při vstupu do kouřovodu.

V některých literaturách se argon ve spalínách přiřazuje k dusíku a protože ve své příloze hodnotu střední měrné tepelné kapacity pro argon nemám, použiji hodnotu pro dusík.

$$\begin{aligned}c_{pN_2} \text{ pro } 300^\circ\text{C} &= 1,311\text{kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K}) \\c_{pH_2O} \text{ pro } 300^\circ\text{C} &= 1,542\text{kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K}) \\c_{pCO} \text{ pro } 300^\circ\text{C} &= 1,317\text{kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K}) \\c_{pO_2} \text{ pro } 300^\circ\text{C} &= 1,356\text{kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K}) \\c_{pCO_2} \text{ pro } 300^\circ\text{C} &= 1,863\text{kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K}) \\c_{pAr} \text{ pro } 300^\circ\text{C} &= c_{pN_2} \text{ pro } 300^\circ\text{C} = 1,311\text{kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K})\end{aligned}$$

$$c_{psp} = \sum \omega_i \cdot c_{pi} \quad [\text{kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K})] \quad (21)$$

Dosazením do vzorce č. (21) získám měrnou tepelnou kapacitu na straně spalín.

$$\begin{aligned}c_{psp} &= \omega_{N_2} \cdot c_{pN_2} + \omega_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + \omega_{CO} \cdot c_{pCO} + \omega_{O_2} \cdot c_{pO_2} + \omega_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + \omega_{Ar} \cdot \\c_{pN_2} &= 0,725 \cdot 1,311 + 0,074 \cdot 1,542 + 0,063 \cdot 1,317 + 0,063 \cdot 1,356 + 0,063 \cdot 1,863 + \\&0,009 \cdot 1,311 = 1,311\text{kJ}/(\text{m}^3_n \cdot \text{K})\end{aligned}$$

Kde	ω_{N_2}	koncentrace dusíku ze vz. č. (18)	[1]
	c_{pN_2}	měr. tep. kapacita dusíku při 300 °C	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	ω_{H_2O}	koncentrace páry ze vz. č. (18)	[1]
	c_{pH_2O}	měr. tep. kapacita páry při 300 °C	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	ω_{CO}	koncentrace oxidu uhelnatého ze vz. č. (18)	[1]
	c_{pCO}	měr. tep. kapacita ox. uhelnatého při 300 °C	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	ω_{O_2}	koncentrace kyslíku ze vz. č. (18)	[1]
	c_{pO_2}	měr. tep. kapacita kyslíku při 300 °C	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	ω_{CO_2}	koncentrace oxidu uhličitého ze vz. č. (18)	[1]
	c_{pCO_2}	měr. tep. kapacita ox. uhličitého při 300 °C	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	ω_{Ar}	koncentrace argonu ze vz. č. (18)	[1]

Teplota spalín ve spalovací komoře s c_{psp} pro 300 °C

Z bilance vstupních a výstupních entalpií – č. (20) si vyjádřím teplotu spalín ve spalovacím prostoru. Teplotu budu počítat pro 1 kg paliva.

$$\Delta t_{sp} = \frac{Q_i + c_{ppal} \cdot \Delta t_{pal} \cdot V_{pal} + c_{pvz} \cdot \Delta t_{vz} \cdot V_{vz,s^v}}{c_{psp} \cdot V_{sp,s^v}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (22)$$

$$\Delta t_{sp} = \frac{14500 + 2,39 \cdot 20 \cdot 1 + 1,299 \cdot 20 \cdot 12,02}{1,311 \cdot 12,74} = 888,047 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Kde	Q_i	výhřevnost paliva	[kJ]
	c_{ppal}	měrná tepelná kapacita dřeva	[kJ/(kg·K)]
	Δt_{pal}	rozdíl teploty paliva	[$^{\circ}\text{C}$]
	V_{pal}	objem dřeva, pro který počítám	[kg]
	c_{pvzd}	měrná tepelná kapacita vzduchu	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	Δt_{vz}	rozdíl teploty vzduchu	[$^{\circ}\text{C}$]
	V_{vz,s^v}	objem vzduchu skutečného vlhkého z vz. č. (7)	[[m ³ _n /kg]
	c_{psp}	měrná tepelná kapacita spalin ze vz. č. (21)	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	V_{sp,s^v}	objem skutečných vlhkých spalin ze vz. č. (10)	[m ³ _n /kg]

Měrná tepelná kapacita spalin – přepočet

Přepočítám si stejným postupem jako výše střední měrnou tepelnou kapacitu spalin. Tentokrát pro 888 $^{\circ}\text{C}$. Pro získání jednotlivých hodnot opět použiji tabulku z přílohy č. 3. Musím si pomoci interpolací hodnot mezi teplotami 800 a 900 $^{\circ}\text{C}$.

Příklad výpočtu interpolace pro střední měrnou tepelnou kapacitu dusíku.

$$c_{pN_2} \text{ pro } 800 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 1,372 \text{ kJ}/(\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{K})$$

$$c_{pN_2} \text{ pro } 900 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 1,385 \text{ kJ}/(\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{K})$$

$$c_{pN_2} \text{ pro } 888 \text{ } ^{\circ}\text{C} = \frac{1,385 - 1,372}{100} \cdot 88 + 1,372 = 1,383 \text{ kJ}/(\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{K})$$

Pro ostatní složky jsem provedla interpolaci stejně. Vyšly tyto hodnoty:

$$c_{pH_2O} \text{ pro } 888 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 1,693 \text{ kJ}/(\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{K})$$

$$c_{pCO} \text{ pro } 888 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 1,398 \text{ kJ}/(\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{K})$$

$$c_{pO_2} \text{ pro } 888 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 1,463 \text{ kJ}/(\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{K})$$

$$c_{pCO_2} \text{ pro } 888 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 2,164 \text{ kJ}/(\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{K})$$

$$c_{pAr} \text{ pro } 888 \text{ } ^{\circ}\text{C} = c_{pN_2} \text{ pro } 888 \text{ } ^{\circ}\text{C} = 1,383 \text{ kJ}/(\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{K})$$

Dosazením do vzorce č. (21) získám opět stř. měrnou tepelnou kapacitu spalin.

$$c_{psp} = \omega_{N_2} \cdot c_{pN_2} + \omega_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + \omega_{CO} \cdot c_{pCO} + \omega_{O_2} \cdot c_{pO_2} + \omega_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + \omega_{Ar} \cdot c_{pAr}$$

$$c_{pN_2} = 0,725 \cdot 1,383 + 0,074 \cdot 1,693 + 0,063 \cdot 1,398 + 0,063 \cdot 1,463 + 0,063 \cdot 2,164 + 0,009 \cdot 1,383 = 1,456 \text{ kJ}/(\text{m}^3_{\text{n}} \cdot \text{K})$$

Kde	ω_{N_2}	koncentrace dusíku ze vz. č. (18)	[1]
	c_{pN_2}	měr. tep. kapacita dusíku při 888 $^{\circ}\text{C}$	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	ω_{H_2O}	koncentrace páry ze vz. č. (18)	[1]
	c_{pH_2O}	měr. tep. kapacita páry při 888 $^{\circ}\text{C}$	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	ω_{CO}	koncentrace oxidu uhelnatého za vz. č. (18)	[1]

c_{pCO}	měr. tep. kapacita ox. uhelnatého při 888 °C	[kJ/(m ³ _n ·K)]
ω_{O_2}	koncentrace kyslíku ze vz. č. (18)	[1]
c_{pO_2}	měr. tep. kapacita kyslíku při 888 °C	[kJ/(m ³ _n ·K)]
ω_{CO_2}	koncentrace oxidu uhličitého ze vz. č. (18)	[1]
c_{pCO_2}	měr. tep. kapacita ox. uhličitého při 888 °C	[kJ/(m ³ _n ·K)]
ω_{Ar}	koncentrace argonu ze vz. č. (18)	[1]

Teplota spalin ve spalovací komoře s c_{psp} pro 888 °C

Znova přepočítám teplotu spalin se střední měrnou tepelnou kapacitou spalin pro 888 °C. Tímto způsobem bych mohla pokračovat do nekonečna, avšak rozdíly ve výsledcích se už nebudou zásadně měnit a pro můj účel si vystačím s touto hodnotou.

$$\Delta t_{sp} = \frac{Q_i + c_{ppal} \cdot \Delta t_{pal} \cdot V_{pal} + c_{pvz} \cdot \Delta t_{vz} \cdot V_{vz,s^v}}{c_{psp} \cdot V_{sp,s^v}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (23)$$

$$\Delta t_{sp} = \frac{14500 + 2,39 \cdot 20 \cdot 1 + 1,299 \cdot 20 \cdot 12,02}{1,447 \cdot 12,74} = 801,124 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Kde	Q_i	výhřevnost paliva	[kJ]
	c_{ppal}	měrná tepelná kapacita paliva ze vzorce	[kJ/(kg·K)]
	Δt_{pal}	rozdíl teploty paliva	[$^{\circ}\text{C}$]
	V_{pal}	objem dřeva, pro který počítám	[kg]
	c_{pvzd}	měrná tepelná kapacita vzduchu	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	Δt_{vz}	rozdíl teploty vzduchu	[$^{\circ}\text{C}$]
	V_{vz,s^v}	objem vzduchu skutečného vlhkého z vz. č. (7)	[m ³ _n /kg]
	c_{psp}	měrná tepelná kapacita spalin ze vz. č. (21)	[kJ/(m ³ _n ·K)]
	V_{sp,s^v}	objem skutečných vlhkých spalin ze vz. č. (10)	[m ³ _n /kg]

$$\Delta t_{sp} = |t_n - t_{1sp}| \rightarrow t_{1sp} = \Delta t_{sp} - t_n \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (24)$$

$$t_{1sp} = \Delta t_{sp} - t_n = 801,124 - 0 = 801,1^{\circ}\text{C}$$

Kde	Δt_{sp}	rozdíl teploty spalin za vz. č. (xx)	[$^{\circ}\text{C}$]
	t_n	teplota za normálních podmínek 0	[$^{\circ}\text{C}$]

5.3 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně spalin

5.3.1 Přestup tepla konvekcí

Jelikož jsem si navrhla výměník členěný na několik různých ploch, přestup tepla prouděním by se dal spočítat třemi různými postupy. Konvekcí kolem svislé plochy výměníku, konvekcí na vodorovnou plochu v horní části a konvekcí v trubkách, kterými prochází spaliny do kouřovodu – viz. obr.č. 5.1. Já budu uvažovat tak, že vypočtený

součinitel α bude ve všech částech obdobný a uvedu tedy jen jeden postup výpočtu, ze kterého později použiji vypočtený součinitel pro celou teplosměnnou plochu výměníku.

Vynucené proudění ve svislém potrubí

Pro přehlednost jsem výchozí hodnoty sepsala do tabulky – tab.č. 5.1

Určující teplotou je aritmetický střed mezi teplotou spalin a teplotou pláště výměníku. Víme, že při vstupu do kouřovodu mají spaliny cca 300 °C. V trubkách bude tedy o něco více – volím 330 °C. A teplotu nerezového plechu taktéž odhaduji. Na 100 °C.

Charakteristický rozměr je vnitřní průměr trubky.

Kinematickou viskozitu, součinitel tepelné vodivosti a Prandtlovo kritérium jsem odečetla za pomoci interpolace z tabulky Fyzikální vlastnosti spalin při tlaku 0,1 MPa – viz. příloha č. 4

Značka veličiny	odečtená hodnota
$t_{urč}$	215 °C
L	0,08 m
ν	$3,475 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
λ	0,041 W/(m·K)
Pr	0,667

tab. č.5.1: Výchozí hodnoty pro lam. proudění spalin

Hmotnostní průtok paliva

Účinnost spalovací komory volím s ohledem na poměrně velký přebytek vzduchu

$$\eta_{sk} = 75 \%$$

A výkon odvedený sálavou složkou kamen si navrhuji podle údaje uváděného výrobcí krbových kamen

$$Q_{sál} = 4 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{Q_{vym} + Q_{sál}}{Q_i \cdot \eta_{sk}} \quad [\text{kg/s}] \quad (25)$$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{5+4}{14500 \cdot 0,75} = 0,001 \text{ kg/s}$$

Kde	Q_{vym}	požadovaný výkon výměníku	[kW]
	$Q_{sál}$	výkon sálání kamen	[kW]

Q_i	výhřevnostpaliva	[kJ/kg]
η_{sk}	účinnostspalovacíkomory	[1]

Skutečný objem spalin

Ze stavové rovnice si vyjádřím objem spalin, které mi budou skutečně proudit spalovací komorou do kouřovodu v závislosti na objemu přiloženého dřeva.

$$\dot{V}_{sp,s} = \frac{(\dot{m}_{pal} \cdot V_{sp,s^v}) \cdot T_{sp}}{T_n} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (26)$$

$$\dot{V}_{sp,s} = \frac{(0,001 \cdot 12,740) \cdot 503,15}{273,15} = 0,019 \text{ m}^3/\text{s}$$

Kde	\dot{m}_{pal}	hmotnostní průtok paliva ze vzorce č. (25)	[kg/s]
	V_{sp,s^v}	objem skutečných vlhkých spalin ze vz. č. (10)	[m ³ _n /kg]
	T_{sp}	teplota spalin v trubkách	[K]
	T_{sp}	teplota spalin za normálních podmínek	[K]

Reynoldsovo kritérium

Reynoldsovo kritérium mi určí, jestli spaliny v trubce proudí laminárně nebo turbulentně. Od toho se bude dále odvíjet způsob výpočtu. Pro jeho získání je třeba znát rychlost proudění spalin v trubce.

$$w = \frac{\dot{V}_{sp,s}}{S_{tr}} \quad [\text{m/s}] \quad (27)$$

$$w = \frac{0,019 \cdot 4}{\pi \cdot 0,08^2 \cdot 6} = 0,644 \text{ m/s}$$

Kde	$\dot{V}_{sp,s}$	skutečný objem spalin zevz. č. (26)	[m ³ /s]
	S_{tr}	průřezy všech trubek	[m ²]

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad [1] \quad (28)$$

$$Re = \frac{0,644 \cdot 0,08}{3,475 \cdot 10^{-5}} = 1482,430 \rightarrow \text{proudění je laminární}$$

Kde	w	rychlost proudění	[m/s]
	L	charakteristický rozměr z tab. č. 5.1	[m]
	ν	kinematická viskozita z tab. č. 5.1	[m ² /s]

Laminární proudění platí do $Re < 2320$.

Grashofovo kritérium

Pro výpočet Grashofova kritéria potřebuji hodnotu součinitele objemové roztažnosti.

$$\gamma = \frac{1}{T_{urč}} = \frac{1}{488,15} = 0,002$$

Gravitační zrychlení je $9,87 \text{ m/s}^2$.

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \gamma \cdot \Delta t}{\nu^2} \quad [1] \quad (29)$$

$$Gr = \frac{9,87 \cdot 0,08^3 \cdot 0,002 \cdot (330 - 100)}{(3,475 \cdot 10^{-5})^2} = 1971580,644$$

Kde	g	gravitační konstanta	[m/s ²]
	L	charakteristický rozměr z tab. č. 5.1	[m]
	γ	souč. objemové roztažnosti	[1]
	Δt	rozdíl mezi tepl. spalin a t. plechu	[°C]
	ν	kinematická viskozita z tab. č. 5.1	[m ² /s]

Nusseltovo kritérium

Jelikož délka trubek je menší než 50 x jejich průměr, musíme zavést opravného součinitele ε_L . Ten pomocí interpolace odečtu z tabulky č. 5.2 pro $l/d = 1,875$.

l/d	1	2	5	10	15	20
ε_l	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13

tab. č.5.2: opravný součinitel pro krátké trubky[15]

$$\varepsilon_L = 1,725$$

$$Nu = 0,74 \cdot (Re \cdot Pr)^{0,2} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot \varepsilon_L \quad [1] \quad (30)$$

$$Nu = 0,74 \cdot (1482,43 \cdot 0,667)^{0,2} \cdot (1971580,644 \cdot 0,667)^{0,1} \cdot 1,725 = 20,749$$

Kde	Re	Reynoldsovo kritérium ze vz. č. (28)	[1]
	Pr	Prandtlovo kritérium z tab. č. 5.1	[1]
	Gr	Grashofovo kritérium ze vz. č. (29)	[1]
	ε_L	opravný součinitel pro krátké trubky	[1]

αspalin pro svislépotrubí

Protože počítám trubky v souproutém výměníku, které jsou uloženy svisle, musím součinitel zvětšit o 15 %.

$$\alpha_{sp,konv} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \cdot 1,15 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (31)$$

$$\alpha_{sp,konv} = \frac{20,749 \cdot 0,041}{0,08} \cdot 1,15 = 12,330 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Kde	Nu	Nusseltovo kritérium ze vz. č. (30)	[1]
	λ	součinitel tepelné vodivosti z tab.č. 5.1	[W/(m·K)]
	L	charakteristický rozměr z tab. č. 5.1	[m]

5.3.2 Přestup tepla radiací

Tlak ve spalovací komoře se bude rovnat tlaku okolí. Tj. 0,1 MPa. Emisní součinitel určuji 0,9. Počítám s tím, že bude zanesen sazemi. Jelikož jsem v intervalu (0,8;1), přepočtu stupeň černosti podle vzorce

$$\varepsilon_{pl} = 0,5 \cdot (\varepsilon_{pl} + 1) \quad [1] \quad (32)$$

$$\varepsilon_{pl} = 0,5 \cdot (0,9 + 1) = 0,95$$

Kde	ε_{pl}	emisní součinitel plechu	[1]
-----	--------------------	--------------------------	-----

Sřední délka zářícího paprsku

$$l = 3,4 \cdot \frac{V_{SK}}{S_{SK}} \quad [m] \quad (33)$$

$$l = 3,4 \cdot \frac{0,55 \cdot 0,5 \cdot 0,45}{2 \cdot (0,55 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,45 + 0,45 \cdot 0,55)} = 0,281 \text{ m}$$

Kde	V_{SK}	objem spalovací komory	[m ³]
	S_{SK}	povrch spalovací komory	[m ²]

Parciální tlaky

$$p_i = p_0 \cdot \frac{\omega_i}{1} \quad [\text{Pa}] \quad (34)$$

Dosazením procentuálního množství CO_2 a H_2O do vz. č. (34) vyjádřím jejich parciální tlaky.

$$p_{\text{CO}_2} = p_0 \cdot \frac{\omega_{\text{CO}_2}}{1} = 1000000 \cdot \frac{0,063}{1} = 6283 \text{ Pa}$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = p_0 \cdot \frac{\omega_{\text{H}_2\text{O}}}{1} = 1000000 \cdot \frac{0,074}{1} = 7362 \text{ Pa}$$

Kde	p_0	tlak ve spalovací komoře	[Pa]
	ω_{CO_2}	koncentrace oxidu uhličitého ze vz. č. (18)	[1]
	$\omega_{\text{H}_2\text{O}}$	koncentrace páry ze vz. č. (18)	[1]

Emisivita zářících molekul spalin

Z diagramů – viz. příloha č. 5 a 6 jsem odečetla emisivitu CO_2 a H_2O pro teplotu $800\text{ }^\circ\text{C}$. Korekční součinitel vlivu záření par je odečtena z dalšího diagramu – př. č. 7 pro parciální tlak vodní páry $7,362\text{ kPa}$.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{CO}_2,sp} &= 0,06 \\ \varepsilon_{\text{H}_2\text{O},sp} &= 0,034 \\ \beta &= 1,04\end{aligned}$$

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{\text{CO}_2,sp} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O},sp} \quad [1] \quad (35)$$

$$\varepsilon_{sp} = 0,06 + 1,04 \cdot 0,034 = 0,095$$

Kde	$\varepsilon_{\text{CO}_2,sp}$	emisivita CO_2 spalin při teplotě $800\text{ }^\circ\text{C}$	[1]
	β	korekční součinitel vlivu záření par	[1]
	$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O},sp}$	emisivita H_2O spalin při teplotě $800\text{ }^\circ\text{C}$	[1]

Pohltnost plamene

Ze stejných diagramů odečteme emisivity CO_2 a H_2O pro teplotu stěny. Ta je, jak jsem si výše odhadla, $100\text{ }^\circ\text{C}$. Pro teplotu stěny menší než $500\text{ }^\circ\text{C}$ se určuje mocnitel n 0,5.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{CO}_2,pl} &= 0,053 \\ \varepsilon_{\text{H}_2\text{O},pl} &= 0,075 \\ n &= 0,5\end{aligned}$$

$$A_p = \varepsilon_{\text{CO}_2,pl} \cdot \left(\frac{T_{sp}}{T_{pl}}\right)^{0,65} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O},pl} \cdot \left(\frac{T_{sp}}{T_{pl}}\right)^n \quad [1] \quad (36)$$

$$A_p = 0,053 \cdot \left(\frac{1074,15}{373,15}\right)^{0,65} + 1,04 \cdot 0,075 \cdot \left(\frac{1074,15}{373,15}\right)^{0,5} = 0,238$$

Kde	$\varepsilon_{\text{CO}_2,pl}$	emisivita CO_2 spalin při teplotě $100\text{ }^\circ\text{C}$	[1]
	T_{sp}	teplota spalin	[K]
	T_{pl}	teplota plechu	[K]
	β	korekční součinitel vlivu záření par	[1]
	$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O},pl}$	emisivita H_2O spalin při teplotě $100\text{ }^\circ\text{C}$	[1]
	n	mocnitel	[1]

Tepelný tok radiací

Hodnoty, které jsem dosud spočítala, dosadím, spolu se Stefan-Boltzmanovou konstantou, do vzorce tepelného toku sáláním. Stefan-Boltzmanova konstanta je $5,6 \cdot 10^{-8}$.

$$q_{rad} = \varepsilon_{pl} \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_{sp} \cdot T_{sp}^4 - A_p \cdot T_{pl}^4) \quad [\text{W/m}^2] \quad (37)$$

$$q_{rad} = 0,95 \cdot 5,6 \cdot 10^{-8} \cdot (0,095 \cdot 1074,15^4 - 0,238 \cdot 373,15^4) = 6592,951 \text{ W/m}^2$$

α spalín radiací

$$\alpha_{sp,rad} = \frac{q_{rad}}{\Delta t} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (38)$$

$$\alpha_{sp,rad} = \frac{6592,951}{801-100} = 9,403 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Kde	q_{rad}	sálání mezi pláštěm a spalínami	$[\text{W}/\text{m}^2]$
	Δt	rozdíl mezi teplotou spalín a plechem	$[^\circ\text{C}]$

5.3.3 α spalín celkem

Pokud uvažuji, že součinitele přestupu tepla radiací i konvekcí budou na celé teplosměnné ploše výměníku stejné, mohu sečíst celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín.

$$\alpha_{sp} = \alpha_{sp,konv} + \alpha_{sp,rad} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (39)$$

$$\alpha_{sp} = 12,330 + 9,403 = 21,733 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

5.4 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vody

Tak jako u spalín, i u vody máme více možností, jak vypočítat součinitel přestupu tepla. Budu předpokládat nucené proudění, vlivem rostoucí teploty vody směrem vzhůru. A výpočet si provedu pro svislou stěnu výměníku.

Vynucené proudění ve svislém kanále

Pro přehlednost jsem výchozí hodnoty sepsala opět do tabulky – tab.č. 5.3

Určující teplotou je aritmetický střed mezi teplotou vody a teplotou pláště výměníku. Teplotu vody použiji jako střední hodnotu mezi vstupní a výstupní teplotou vody do výměníku 67,5 °C. A teplotu nerezového plechu opět odhaduji na 100 °C.

Charakteristický rozměr je hydraulický průměr kanálu podle vzorce

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{o} \quad [\text{m}] \quad (40)$$

$$d_h = \frac{4 \cdot 0,05 \cdot 0,5}{2 \cdot (0,05 + 0,5)} = 0,092 \text{ m}$$

Kde S průřez kanálu [m²]
O obvod kanálu [m]

Součinitel tepelné vodivosti Prandtlovo kritérium jsem odečetla za pomoci interpolace z tabulky Fyzikální vlastnosti nasycené vody a nasycené vodní páry – viz. příloha č. 8 Kinematickou viskozitu zde musím vypočítat z dynamické viskozity vody.

Značka veličiny	odečtená hodnota
$t_{urč}$	83,75 °C
L	0,092 m
η	$3,406 \cdot 10^{-4}$ Pa/s
λ	0,676 W/(m·K)
Pr	2,118

tab. č.5.3: : Výchozí hodnoty pro lam. proudění vody

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_{H_2O}} \quad [m^2/s] \quad (41)$$

$$\nu = \frac{3,406 \cdot 10^{-4}}{1000} = 3,406 \cdot 10^{-7} \quad m^2/s$$

Kde η dynamická viskozita při 83,75 °C [Pa/s]
 ρ_{H_2O} hustota vody [kg/m³]

Měrná tepelná kapacita vody

Měrnou tepelnou kapacitu vody určím pomocí tabulky Fyzikální vlastnosti nasycené vody a nasycené vodní páry – viz. příloha č. 8. Pro stř. teplotu vstupní a výstupní vody tj. 67,5 °C interpolací najdu požadovanou hodnotu.

$$c_{pv} \text{ pro } 60 \text{ °C} = 4,179 \text{ kJ/(kg·K)}$$

$$c_{pv} \text{ pro } 80 \text{ °C} = 4,195 \text{ kJ/(kg·K)}$$

$$c_{pv} \text{ pro } 67,5 \text{ °C} = 4,185 \text{ kJ/(kg·K)}$$

Hmotnostní průtok vody

Pro výpočet hmotnostního průtoku použiji vzorec pro tepelnou bilanci výměníku.

$$Q_{vym} = \dot{m}_v \cdot c_{pv} \cdot (t_{1v} - t_{2v}) \quad [kW] \quad (42)$$

Vyjádřím si z rce č. (42) hmotnostní průtok.

$$\dot{m}_v = \frac{Q_{vym}}{c_{pv} \cdot (t_{1v} - t_{2v})} = \frac{5}{4,185 \cdot (75 - 60)} = 0,080 \text{ kg/s}$$

Kde	Q_{vym}	požadovaný výkon výměníku	[kW]
	c_{pv}	měrná tepelná kapacita vody pro 67,5 °C	[kJ/(kg·K)]
	t_{1v}	výstupní teplota vody	[°C]
	t_{2v}	vstupní teplota vody	[°C]

Skutečný objem vody

Přepočítám hmotnostní průtok na objemový, který mi bude skutečně proudit výměníkem v závislosti na objemu přiloženého dřeva.

$$\dot{V}_v = \frac{\dot{m}_v}{\rho_{H_2O}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (43)$$

$$\dot{V}_v = \frac{0,080}{1000} = 0,00008 \quad \text{m}^3/\text{s}$$

Kde	\dot{m}_v	hmotnostní průtok vody	[kg/s]
	ρ_{H_2O}	hustota vody	[kg/m ³]

Reynoldsovo kritérium

Reynoldsovým kritériem opět určím, jestli voda proudí ve výměníku laminárně nebo turbulentně. Pro jeho získání je třeba znát rychlost proudění vody ve výměníku. Použiji vzorce (27) a (28).

$$w = \frac{\dot{V}_v}{S} \quad [\text{m/s}]$$

$$w = \frac{0,00008}{0,028} = 0,0029 \text{ m/s}$$

Kde	\dot{V}_v	skutečný objem vody ze vz. č. (43)	[m ³ /s]
	S	průřez kanálu	[m ²]

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad [1]$$

$$Re = \frac{0,0029 \cdot 0,092}{3,406 \cdot 10^{-7}} = 779,548 \rightarrow \text{proudění je laminární}$$

Kde	w	rychlost proudění ze vz. č. (27)	[m/s]
	L	charakteristický rozměr z tab. č. 5.2	[m]
	ν	kinematická viskozita ze vz. č. (41)	[m ² /s]

Laminární proudění platí do $Re < 2320$.

Grashofovo kritérium

Součinitel objemové roztažnosti

$$\gamma = \frac{1}{T_{urč}} = \frac{1}{356,9} = 0,003$$

Gravitační zrychlení je $9,87 \text{ m/s}^2$

Do vzorce pro Grashofovo kritérium č. (29) dosadím získané hodnoty

$$Gr = \frac{9,87 \cdot 0,092^3 \cdot 0,003 \cdot (100 - 67,5)}{(3,406 \cdot 10^{-7})^2} = 5\,968\,291\,145,131$$

Kde	g	gravitační konstanta	$[\text{m/s}^2]$
	L	charakteristický rozměr z tab. č. 5.2	$[\text{m}]$
	γ	souč. objemové roztažnosti	$[1]$
	Δt	rozdíl mezi tepl. vody a tepl. plechu	$[\text{°C}]$
	ν	kinematická viskozita ze vzorce č. (41)	$[\text{m}^2/\text{s}]$

Nusseltovo kritérium

Jelikož výška výměníku je menší než 50 x hydraulický průměr, musím zavést opravného součinitele ε_L . Ten pomocí interpolace odečtu z tabulky č. 5.2 pro $l/d = 5,455$.

$$\varepsilon_L = 1,425$$

Dosadím do vzorce pro Nusseltovo kritérium č. (30)

$$Nu = 0,74 \cdot (779,548 \cdot 2,118)^{0,2} \cdot (5\,968\,291\,145,131 \cdot 2,118)^{0,1} \cdot 1,425 = 47,524$$

Kde	Re	Reynoldsovo kritérium ze vz. č. (28)	$[1]$
	Pr	Prandtlovo kritérium z tab. č. 5.2	$[1]$
	Gr	Grashofovo kritérium ze vz. č. (29)	$[1]$
	ε_L	opravný součinitel pro krátké trubky	$[1]$

α vody pro svislý kanál

Protože počítám kanál v souproutém výměníku, který je uložený svisle, musím součinitele opět zvětšit o 15 %.

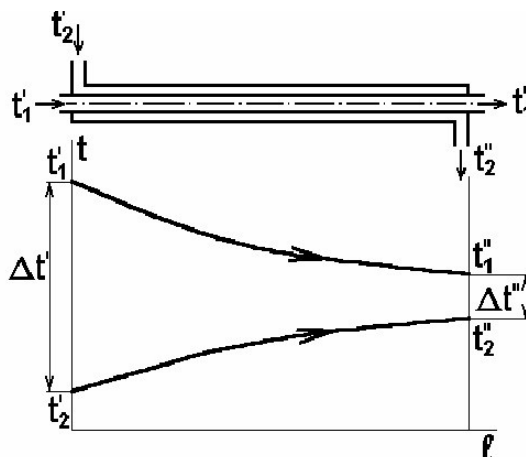
$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \cdot 1,15 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (44)$$

$$\alpha_v = \frac{47,524 \cdot 0,676}{0,092} \cdot 1,15 = 402,918 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Kde	Nu	Nusseltovo kritérium ze vz. č. (30)	$[1]$
	λ	součinitel tepelné vodivosti z tab.č. 5.2	$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
	L	charakteristický rozměr z tab. č. 5.2	$[\text{m}]$

6 Kontrolní výpočet výměníku

Pro kontrolu si nyní spočítám, jestli jsem svým navrhnutým výměníkem dosáhla požadovaného výkonu 5 kW. Použiji výpočty pro souproudý výměník. V obr. č. 6.1 představují hodnoty t_1 teploty spalin a t_2 vstupní a výstupní teplotu vody ve výměníku. Opět všechny vzorce jsem čerpala z literatury [15].



Obr. č. 6.1: souproudý výměník [Termodynamika.pdf]

Má teplosměnná plocha výměníku

$S_{TS} = \text{zadní plocha v.} + \text{vrchní plocha v.} + \text{plocha trubek}$

$$S_{TS} = 0,636 \text{ m}^2$$

Součinitel prostupu tepla

V příloze č. 9 jsem si vyhledala součinitel tepelné vodivosti nerezové oceli.

$$\lambda_{pl} = 23,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sp}} + \frac{x}{\lambda_{pl}} + \frac{1}{\alpha_v}} \quad [\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}] \quad (45)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{21,733} + \frac{0,04}{23,6} + \frac{1}{402,918}} = 20,549 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Kde	α_{sp}	součinitel přestupu tepla spalin ze vz. č. (39)	$[\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}]$
	x	šířka svislé části výměníku z navrhnutého rozměru	$[\text{m}]$
	λ_{pl}	součinitel tepelné vodivosti plechu	$[\text{W/(m}\cdot\text{K)}]$
	α_v	součinitel přestupu tepla vody ze vz. č.(44)	$[\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}]$

Střední logaritmický teplotní rozdíl

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (46)$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{741,124 - 225}{\ln \frac{741,124}{225}} = 432,965 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Kde	$\Delta t'$	teplotní spád	[$^{\circ}\text{C}$]
	$\Delta t''$	teplotní spád	[$^{\circ}\text{C}$]

Kontrolní výpočet výkonu

$$Q = k \cdot S_{TS} \cdot \Delta t_{stř} \quad [\text{kW}] \quad (47)$$

$$Q = 20,549 \cdot 0,636 \cdot 432,965 = 5658,906 \text{ W} = 5,659 \text{ kW}$$

Kde	k	součinitel prostupu tepla ze vz. č. (45)	[W/(m ² ·K)]
	S_{TS}	teplosměnná plocha výměníku	[m ²]
	$\Delta t_{stř}$	střední logaritmický rozdíl ze vz. č. (46)	

$$Q > Q_{wym}$$

Závěr

Výměník pro krbová kamna, který jsem navrhla, splňuje za výše uvedených podmínek zadaný tepelný výkon vodě 5 kW. Ve skutečnosti bude jeho výkon větší, protože mnou navrhované rozměry jsou schopny předat cca o 15 % větší výkon.

Tedy při zachování mnou navržených rozměrů výměníku budu mít k dispozici vyšší tepelný výkon, který mohu předávat vodě a bude dostatečný pro vytápění menšího rodinného domu a to i jako hlavní zdroj tepla.

V praxi je běžnější, že krbová kamna tohoto typu se používají převážně jako zdroj doplňkový např. k plynovému kotli.

Zpracované téma mě velmi obohatilo o cenné vědomosti a věřím, že bude přínosem i pro další čtenáře.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Vytápění rodinných domů topným olejem I. [online]. 2010 [cit. 2012-2-15]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/6831-vytapani-rodinnych-domu-topnym-olejem-i>
- [2] Vytápění rodinných domů topným olejem III. [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/7137-vytapani-rodinnych-domu-topnym-olejem-iii>
- [3] SPŠ STROJNICKÁ. *Vytápění: pracovní sešit*. Tábor, 2005. Dostupné z: http://archiv.sps-tabor.cz/attachment/sipvz_vytapani.pdf
- [4] A-Z krby: Teplovzdušné nebo teplovodní vytápění?. *A - Z KRBY: teplovzdušné a teplovodní vytápění - výhody a nevýhody* [online]. 2012 [cit. 2012-01-28]. Dostupné z: http://www.az-krby.cz/cs/teplovzdusne_nebo_teplovodni_vytapani
- [5] TZB info: vytápění. *TZB info: stavebnictví, úspory energií* [online]. 27. 9. 2011 [cit. 2012-02-26]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/elektricke-vytapani/7871-tvurce-nove-generace-salavych-lokalnich-topidel-inspirovalo-slunce>
- [6] TZB info: vytápění. *TZB info: stavebnictví, úspora energií* [online]. 2011-11-23 [cit. 2012-01-18]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/elektricke-vytapani/8057-srovnacni-mereni-spotreby-energie-mezi-infracervenym-vytapenim-a-plynovym-vytapenim>
- [7] DUBISOVÁ PETROFFOVÁ, Marie - Pierre a Vladimír INSTITORIS. *Krby a kamna*. Bratislava: Jaga group, spol. s r. o., 2004. ISBN 80-88905-92-3.
- [8] TZB info: vytápění. BUFKA, Aleš. *TZB info: stavebnictví, úspory energií* [online]. 19. 12. 2011 [cit. 2012-02-26]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/8127-mala-spalovaci-zarizeni-na-pevna-paliva-pro-domacnosti>
- [9] ČERNÝ, Václav. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. dotisk. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1988.
- [10] BLAHOŽ, Vladimír a Zdeněk KADLEC. *Základy sdílení tepla*. 2. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2000, 109 s. ISBN 80-902-0011-7.

[11] NOSKIEVIČ, Pavel a Radek PILCH. *Spalování dřeva v malém ohništi*. Vyd. 1. Suchdol nad Odrou: Romotop, 2008, 80 s. ISBN 978-80-248-1889-4.

[12] AMTEO. *Automatická krbová kamna na pelety* [propagační leták]. 2011 [cit. 1.3.2012]

[13] ABX, společnost s r. o. *Krbová kamna s teplovodním výměníkem: Všeobecný návod k obsluze, montáži a údržbě*. Varnsdorf, 2011. Dostupné z: <http://www.abx.cz/files/krbova-kamna-s-teplovodnim-vymenikem-vseobecny-navod-k-obsluze-montazi-a-udrzbe-c-1.pdf>

[14] ČSN 07 0302. *Přejímací zkoušky parních kotlů*. Praha: EKSTEP, 1996.

[15] KADLEC, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. 1. vyd. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009, 100 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-061-6

Poděkování

Na závěr bych chtěla poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Zdeňku Kadlecovi, Ph.D. za podporu po dobu vytváření mé práce, za cenné rady a připomínky, které mě dovedli ke zdárnému závěru.

Seznam příloh

1. Měrná tepelná kapacita vzduchu
2. Měrná tepelná kapacita pevných látek
3. Měrná tepelná kapacita plynu za stálého tlaku
4. Fyzikální vlastnosti spalin při tlaku 0,1 Mpa
5. Diagram pro určení emisivity CO_2
6. Diagram pro určení emisivity H_2O
7. Diagram korekčního součinitele β
8. Fyzikální vlastnosti nasycené vody a páry
9. Hustota a tepelná vodivost kovů a slitin

1. Měrná tepelná kapacita vzduchu

Měrná tepelná kapacita vzduchu za stálého tlaku a za stálého objemu při uvedené teplotě t a střední v rozmezí teplot 0 až t

t °C	c_p kJ.m ⁻³ .K ⁻¹	c_{p0} kJ.m ⁻³ .K ⁻¹	c_p kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	c_v kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	c_{p0} kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	c_{v0} kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹
0	1,297	1,297	1,004	0,716	1,004	0,716
100	1,306	1,300	1,010	0,723	1,006	0,719
200	1,324	1,307	1,025	0,737	1,012	0,724
300	1,350	1,317	1,045	0,758	1,019	0,732
400	1,381	1,329	1,069	0,781	1,028	0,741
500	1,412	1,343	1,092	0,805	1,039	0,752
600	1,441	1,357	1,115	0,828	1,050	0,762
700	1,468	1,371	1,136	0,849	1,061	0,773
800	1,492	1,384	1,154	0,867	1,071	0,784
900	1,513	1,398	1,170	0,883	1,081	0,794
1000	1,531	1,410	1,184	0,898	1,091	0,804
1100	1,547	1,421	1,197	0,910	1,100	0,813
1200	1,562	1,433	1,208	0,921	1,108	0,821
1300	1,574	1,443	1,218	0,931	1,117	0,829
1400	1,586	1,453	1,227	0,940	1,124	0,837
1500	1,596	1,462	1,235	0,948	1,131	0,844
1600	1,605	1,471	1,242	0,955	1,138	0,851
1700	1,614	1,479	1,249	0,961	1,144	0,857
1800	1,622	1,487	1,254	0,968	1,150	0,863
1900	1,629	1,494	1,260	0,973	1,156	0,869
2000	1,635	1,501	1,265	0,979	1,161	0,874
2100	1,642	1,507	1,270	0,983	1,166	0,879
2200	1,648	1,514	1,275	0,988	1,171	0,884
2300	1,653	1,519	1,279	0,992	1,176	0,889
2400	1,658	1,525	1,283	0,996	1,180	0,893
2500	1,663	1,530	1,287	1,000	1,184	0,897
2600			1,293	1,006x		
2700			1,295	1,008		
2800			1,298	1,011		
2900			1,301	1,014		
3000	1,683		1,302	1,034		

* od teploty 2600 °C vypočteno pomocí vztahu $c_v = c_p - r$, $r = 0,287 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

[15]

2. Měrná tepelná kapacita pevných látek

Měrná tepelná kapacita vybraných pevných látek při teplotě t °C

látko	t °C	c $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	látko	t °C	c $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
asfalt	20	0,92	pískovec	20	0,71
azbest	20	0,8	porcelán	20	0,8
beton	20	0,88		100	1,3
beton pórovitý	20	0,8	sádra	20	1,09
dřevo-borovice, jedle, smrk	20	2,72	sklo - jenské	20	0,78
- dub	20	2,39	- křemenné	20	0,73
guma	20	1,42	- obyčejné	20	0,77
hlína	20	0,88	sníh	-40	1,81*
heraklit	20	1,67	struska vysokopecní	20	0,84
kamenina	20	0,8		1000	1,17
koks (10 % popele)	100	0,81*	uhlí - dřevěné	20	0,84
	600	1,29*	- hnědé 12% vody	100	1,51*
	1200	1,52*	- hnědé 48% vody	100	2,59*
korek přírodní	20	1,88	- kamenné	100	1,0 ÷ 1,1*
kotelni kámen	300	0,84	umělé hmoty- bakelit	20	1,59
křemen	20	0,75	- PE rozvětvený	20	2,3
led	-20	2,14*	- polypropylén	20	1,8
lepenka, papír	20	1,34	- PVC čistý	20	1,36
mramor	20	0,8	- polystyrén	20	1,26
omítka	20	0,84	zdivo červené	20	1,05
popel	100	0,81*	zem šterkovitá	20	1,88
	1000	0,98*	žula	20	0,75

* střední měrné tepelné kapacity v teplotním intervalu 0 - t °C

3. Měrná tepelná kapacita plynu za stálého tlaku

plyn	O_2		N_2		H_2		CO		CO_2		H_2O		SO_2	
t °C	C_p $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_{po}^t $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_p $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_{po}^t $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_p $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_{po}^t $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_p $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_{po}^t $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_p $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_{po}^t $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_p $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_{po}^t $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_p $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	C_{po}^t $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
0	1,306	1,306	1,299	1,299	1,277	1,277	1,299	1,299	1,600	1,600	1,494	1,494	1,733	1,733
100	1,333	1,318	1,303	1,300	1,300	1,291	1,305	1,302	1,794	1,700	1,519	1,505	1,892	1,813
200	1,375	1,335	1,315	1,304	1,305	1,297	1,323	1,307	1,949	1,787	1,560	1,522	2,031	1,888
300	1,420	1,356	1,336	1,311	1,307	1,299	1,350	1,317	2,075	1,863	1,608	1,542	2,152	1,955
400	1,462	1,377	1,364	1,321	1,311	1,302	1,382	1,329	2,180	1,930	1,659	1,565	2,24	2,018
500	1,497	1,398	1,394	1,332	1,319	1,305	1,415	1,343	2,267	1,989	1,713	1,590	2,307	2,068
600	1,526	1,417	1,424	1,345	1,329	1,308	1,446	1,357	2,340	2,041	1,769	1,615	2,357	2,114
700	1,550	1,434	1,452	1,359	1,343	1,312	1,473	1,372	2,402	2,088	1,827	1,641	2,399	2,152
800	1,571	1,450	1,477	1,372	1,360	1,317	1,498	1,386	2,453	2,131	1,885	1,668	2,428	2,181
900	1,588	1,465	1,499	1,385	1,377	1,323	1,519	1,400	2,496	2,169	1,941	1,696	2,453	2,215
1000	1,602	1,478	1,519	1,397	1,396	1,329	1,538	1,413	2,533	2,204	1,995	1,723	2,474	2,236
1100	1,616	1,489	1,536	1,409	1,415	1,336	1,554	1,425	2,564	2,235	2,046	1,750	2,487	2,261
1200	1,628	1,501	1,551	1,420	1,434	1,343	1,568	1,436	2,591	2,264	2,093	1,777	2,5	2,278
1300	1,640	1,511	1,564	1,431	1,454	1,351	1,580	1,447	2,614	2,290	2,137	1,803		
1400	1,650	1,520	1,576	1,441	1,472	1,359	1,590	1,457	2,634	2,314	2,177	1,828		
1500	1,661	1,529	1,586	1,450	1,490	1,367	1,600	1,466	2,651	2,335	2,214	1,853	2,533	2,313 *
1600	1,672	1,538	1,595	1,459	1,506	1,375	1,608	1,475	2,665	2,355	2,249	1,876		
1700	1,683	1,546	1,603	1,467	1,522	1,383	1,615	1,483	2,678	2,374	2,281	1,900		
1800	1,693	1,554	1,610	1,475	1,537	1,392	1,620	1,490	2,689	2,392	2,310	1,921		
1900	1,703	1,562	1,617	1,482	1,551	1,400	1,627	1,497	2,698	2,407	2,337	1,942		
2000	1,713	1,569	1,622	1,489	1,564	1,408	1,633	1,504	2,706	2,422	2,361	1,963	2,554	2,384 *
2100	1,724	1,576	1,628	1,496	1,576	1,415	1,638	1,510	2,713	2,436	2,384	1,982		
2200	1,734	1,583	1,632	1,502	1,589	1,423	1,642	1,516	2,718	2,448	2,406	2,001		
2300	1,743	1,590	1,637	1,507	1,599	1,430	1,646	1,521	2,722	2,460	2,425	2,019		
2400	1,757	1,596	1,641	1,513	1,610	1,437	1,650	1,527	2,724	2,471	2,444	2,036		
2500	1,762	1,603	1,645	1,518	1,620	1,445	1,653	1,532	2,725	2,481	2,461	2,053	2,571	2,467 *
2600	1,771	1,609			1,630	1,452					2,477	2,069		
2700	1,781	1,615			1,639	1,458					2,492	2,085		
2800											2,507	2,100		
2900											2,520	2,113		
3000	1,796		1,662		1,666		1,666	1,555 *	2,738	2,523 *	2,520		2,579	2,447 *

[15]

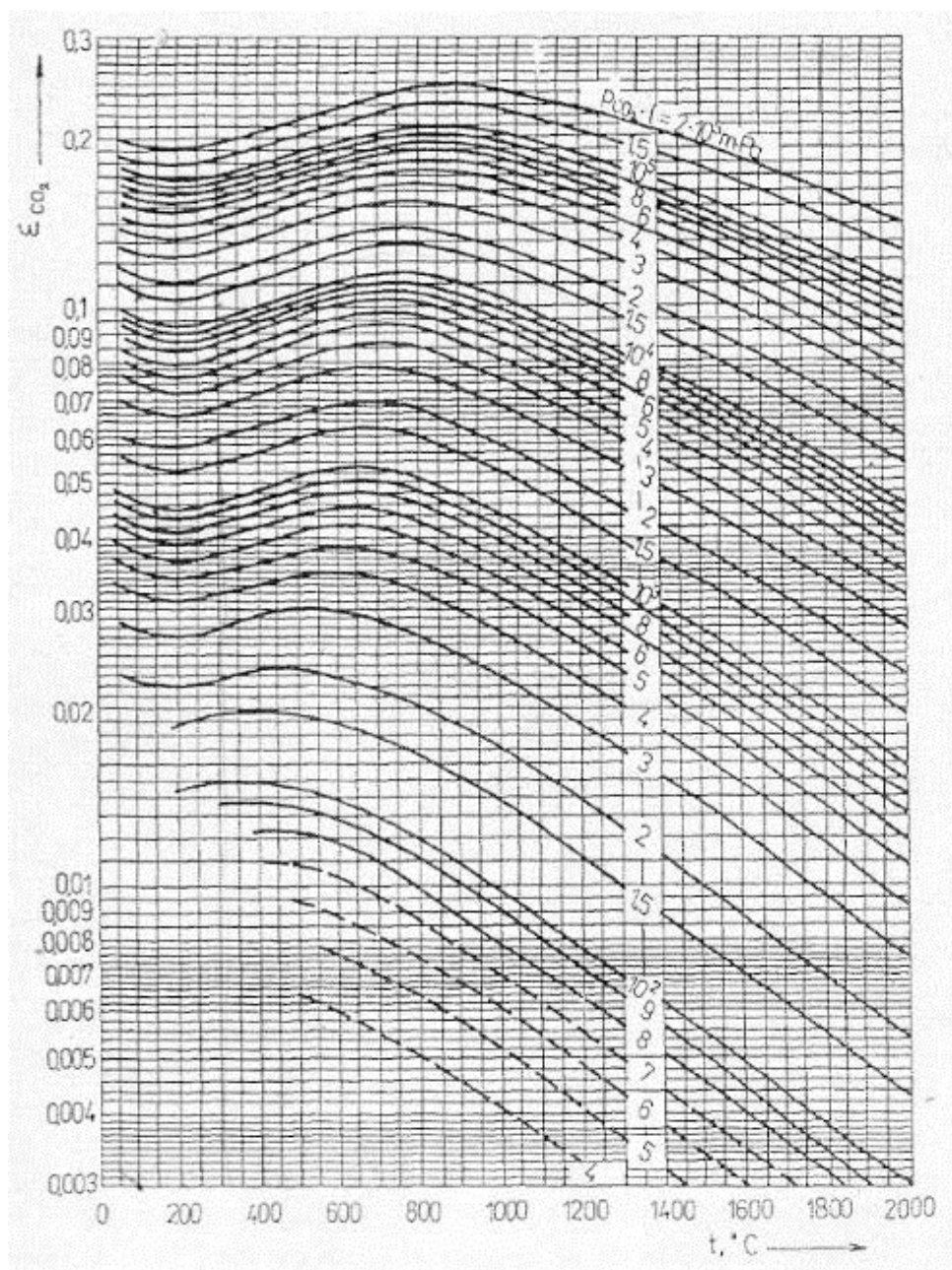
4. Fyzikální vlastnosti spalin při tlaku 0,1 MPa

Fyzikální vlastnosti spalin při tlaku 101325 Pa (760 torr)
objemové koncentrace složek: 13%CO₂, 11%H₂O, 76%N₂

t °C	ρ kg.m ⁻³	c _p kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	λ.10 ² W.m ⁻¹ .K ⁻¹	a.10 ⁶ m ² .s ⁻¹	η.10 ⁵ Pa.s	ν.10 ⁶ m ² .s ⁻¹	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,10	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,80	0,60
900	0,301	1,290	10,00	258,0	45,9	152,50	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,30	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,10	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,00	0,56

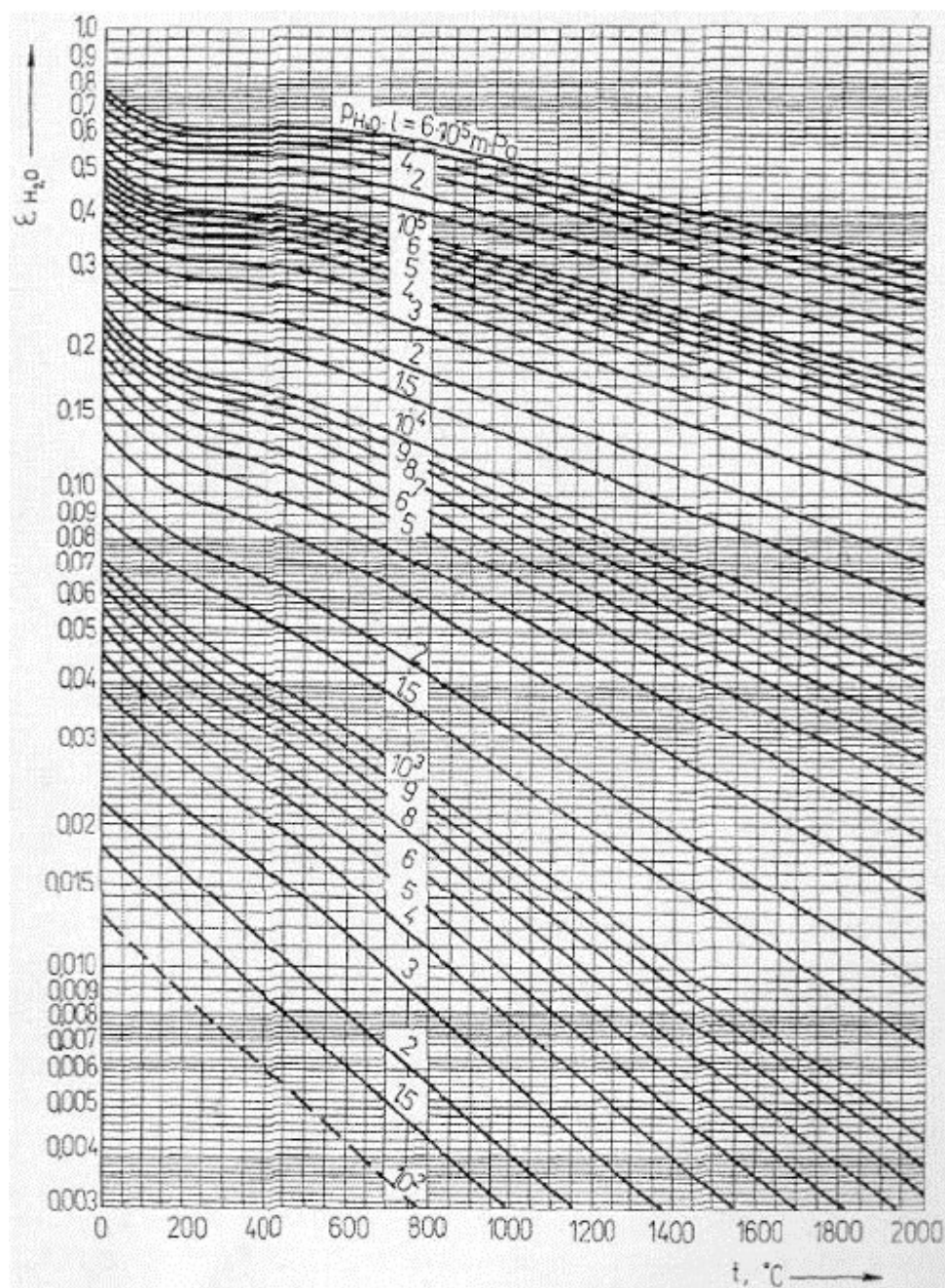
[15]

5. Diagram pro určení emisivity CO_2



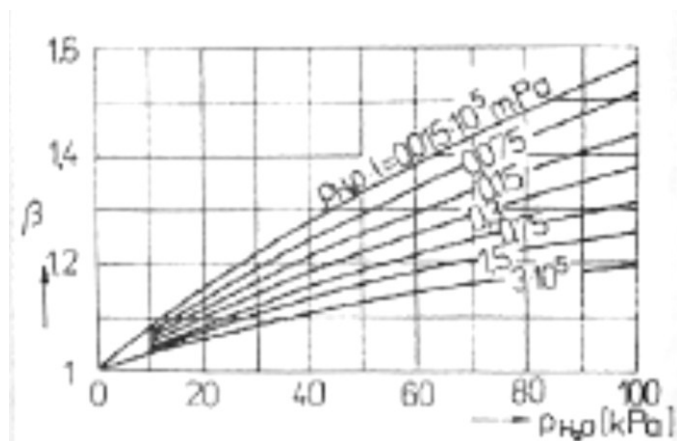
[15]

6. Diagram pro určení emisivity H_2O



[15]

7. Diagram korekčního součinitele β



8. Fyzikální vlastnosti nasycené vody a páry

Fyzikální vlastnosti nasycené vody a nasycené vodní páry

t °C	c_p (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)		$\lambda \cdot 10^2$ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)		$\eta \cdot 10^6$ (Pa.s)		Pr (-)	
	voda	pára	voda	pára	voda	pára	voda	pára
0	4,222		55,1		1788		13,67	
20	4,183		59,9		1004		7,02	
40	4,174		63,5		653,3		4,31	
60	4,179		65,9		469,9		2,98	
80	4,195		67,4		355,1		2,21	
100	4,22	2,135	68,3	2,37	282,5	11,97	1,75	1,08
120	4,25	2,206	68,6	2,59	237,4	12,85	1,47	1,09
140	4,287	2,315	68,5	2,79	201,1	13,54	1,26	1,12
160	4,346	2,479	68,3	3,01	173,6	14,32	1,1	1,18
180	4,417	2,709	67,4	3,27	153	15,11	1	1,25
200	4,505	3,023	66,3	3,55	136,4	15,99	0,93	1,36
220	4,614	3,408	64,5	3,9	124,6	16,87	0,89	1,47
240	4,756	3,881	62,8	4,29	114,8	17,76	0,87	1,61
260	4,949	4,486	60,5	4,8	105,9	18,84	0,87	1,75
280	5,23	5,234	57,4	5,49	98,1	19,91	0,9	1,9
300	5,736	6,28	54	6,27	91,2	21,29	0,97	2,13
320	6,574	8,206	50,6	7,51	85,3	22,86	1,11	2,5
340	8,165	12,85	45,7	9,3	77,5	25,21	1,39	3,35
360	13,984	23,03	39,5	12,79	66,7	29,14	2,35	5,23

[15]

9. Hustota a tepelná vodivost kovů a slitin

Hustota a tepelná vodivost kovů a slitin

slitiny a kovy neželezné	t °C	ρ kg.m ⁻³	λ W.m ⁻¹ .K ⁻¹	oceli a litina	t °C	ρ kg.m ⁻³	λ W.m ⁻¹ .K ⁻¹
bronz Cu, 1Sn	0	8900	63,7	konstrukční uhlíková ocel 0,1 C	0	7860	59,5
Cu, 10Sn	20	8770	41,9		500		40,2
Cu, 25Sn	20	≈8900	25,6		1100		28,5
Cu, 9Al, 3Fe	0	7500	32,1	0,35C	0	7860	47,9
	300		45,9		500		40,6
	700		54,6		1100		29,5
cin	0	7300	64	uhlíková ocel na odlitky 0,1-0,2C	0	7840	41,9
	200		57		300		40,6
hliník	0	2720	218		700		38,1
	300		230	0,5-0,6C	0	7840	43,8
hliníkové slitiny					300		41,9
Al, 8Mg	0	-	95	ušlechtilá konstr. ocel	700		39,0
	300		138	mangan. 1,2-1,6Mn	0	7850	46,2
Al, 12Si	0	2650	158		500		37,2
	300		176		1100		28,6
Al, 4Cu, 1Mg (dural)	0	2800	159	chromová 0,8-1,1Cr	0	7850	36,5
	300		203		500		32,8
hořčík	0	1740	160		1100		23,3
	300		136	chromvanadová	0	7850	25,9
	600		131	1,2-1,5Cr 0,45-0,6V	500		32,5
měď	0	8060	385		1100		22,8
	400		364	nerez oceli			
	800		343	chromová	0	7670	21,2
mosaz	0	8790	102	martenzitická 13Cr	500		23,6
Cu, 10Zn	300		149		1100		25,0
	600		195	chromniklová	0	7800	12,6
mosaz	0	8400	106	austenit. 18Cr, 10,5Ni	500		21,4
Cu, 40Zn	300		152		1100		29,2
	600		200	litina šedá	20	7310	49,4
mosaz Cu, 40Ni	0	8800	22,2	2,9-3,1C, 1,35-1,6Si	300		41,9
(konstantan)	100		25,6	0,9+1Mn	500		36,4
olovo	0	11340	29	litina			
	300		34,4	žáruvzdorná	20	6680	33,9
stříbro (99,9 %)	0	10500	411	hliníko-chromová	300		31,0
	300		362	6-8Al, 2-3Cr	700		27,2
zinek	0	7130	113				
	300		100				

[15]